مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

المنظمة العربية للترجمة

مارك راتنر

دانيال راتنر

التقانة النانوية

مقدمة مبسَّطة للفكرة العظيمة القادمة

ترجمة

د. حاتم النجدي

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

مع تحيات د. سلام حسين الهلالي

salamalhelali@yahoo.com

https://www.facebook.com/salam.alhelali

https://www.researchgate.net/profile/Salam_Alhelali?ev=hdr_xprf

07807137614

المحتويـــات

تقديـــم 11

تمهيـــد 13

1 ـ مقدمة للنانو 15

لماذا الاهتمام بالنانو؟ 16

من يجب أن يقرأ هذا الكتاب؟ 18

ما هو النانو؟ تعريف 20

ملاحظة عن واحدات القياس 24

2 ـ مسألة الأبعاد 25

نوع مختلف من الصِّغَر 26

بعض تحدِّيات النانو 30

3 ـ العلم الأساسي الكامن وراء التِقانة النانوية 35

الإلكترونات 36

الذرّات والشوارد 37

الجُزَيئات 39

المعادن 41

موادّ أخرى 42

المنظومات الحيويّة 44
التعرُّف الجُزَيئي 47
النقل الكهربائي وقانون أوم 49
الميكانيك الكمُّومي والأفكار الكمُّومية 50
البصريّات 52

4 ـ أدوات العلم النانوي 53
أدوات قياس البُنى النانوية 55
أجهزة مِجسَّات المسح 55
المِطْيافِيّة 57
الكهركيمياء 58
المِجْهَر الإلكتروني 58
أدوات صُنع البُنى النانوية 59
أجهزة مِجسَّات المسح مرّة أخرى 59
الطباعة في السلَّم النانوي 60
الطباعة النانوية بالقلم الغاطس 61
الطباعة بالحُزمة الإلكترونية 62
الطباعة باقتلاع الكُرات النانوية 63
التركيب الجُزَيئي 64
التجميع الذاتي 65
تنمية البلّورات في السلَّم النانوي 68
البَلْمَرة 69
القرميد النانوي ولبِنات البناء 70
أدوات تصوير السلوك في السلَّم النانوي 74
التصميم النانوي بمساعدة الحاسوب 75

5 ـ نقاط وأماكن هامّة: الجولة الكبرى 79
الموادّ الذكيّة 80
المُحِسَّات 81
بُنى حيويّة نانوية المقاس 83
التقاط الطاقة وتحويلها وخَزْنها 84
البصريّات 85
المغانِط 94
التصنيع 95
الإلكترونيّات 96
الإلكترونيّات مرّة أخرى 97
النَّمْذَجة 97

6 ـ الموادّ الذكيّة 101
البُنى ذاتيّة الالتئام 103
التعرُّف 105
الفصل 106
مُحفِّزات التفاعل 108
البُنى النانوية والمركَّبات المتباينة الخواصّ 110
التغليف 111
السلع الاستهلاكية 112

7 ـ المُحِسَّات 115
المُحِسَّات النانوية الطبيعية 116
المُحِسَّات الكهرمغنطيسية 118
المُحِسَّات الحيوية 120
الأنوف الإلكترونيّة 124

8 ـ التطبيقات الطبّية الحيويّة 127
العقاقير 128
التزويد بالدواء 130
المعالجة الضوئية الديناميكية 133
المحرِّكات الجُزَيئية 134
الملتَقيات العصبية الإلكترونيّة 135
هندسة البروتينات 137
تسليط ضوء جديد على الخلايا: اللصيقات النانوية التلألؤ 138

9 ـ البصريّات والإلكترونيّات 141
طاقة الضوء والتقاطها، والكهرضوئيات 142
توليد الضوء 147
نقل الضوء 149
التحكُّم في الضوء واستعماله 150
الإلكترونيّات 152
أنابيب الكربون النانوية 153
الإلكترونيّات الجُزَيئية الطريّة 154
الذواكر 155
البوّابات والقواطع 157
البُنيانات 159

10 ـ الأعمال النانوية 177
الازدهار والإفلاس والتِقانة النانوية: الثورة الصناعية التالية؟ 178
الأعمال النانوية اليوم 179

التِقانة المتقدمة، والتِقانة الحيويّة، والتِقانة النانوية 182
مشهد الاستثمار 183
دروس أخرى من الدوت كوم 188

11 ــ أنت والتِقانة النانوية 191
التِقانة النانوية: الآن وهنا 192
الأخلاق والنانو: النظر إلى المخفيّ وراء بشائر التِقانة النانوية 197

الملحق (أ): بعض المصادر الجيّدة للتِقانة النانوية 203

الثبت التعريفي 207

ثَبْت المصطلحات: عربي ــ إنجليزي 221

ثَبْت المصطلحات: إنجليزي ــ عربي 224

المؤلِّفان 227

الفهرس 229

تقديـم

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية
مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي

يطيب لي أن أقدم لهذه السلسلة التي جرى انتقاؤها في مجالات تقنية ذات أولوية للقارئ العربي في عصر أصبحت فيه المعرفة محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي والتقني، ويأتي نشر هذه السلسلة بالتعاون بين مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية والمنظمة العربية للترجمة، ويقع في إطار تلبية عدد من السياسات والتوصيات التي تعنى باللغة العربية والعلوم، ومنها:

أولاً: البيان الختامي لمؤتمر القمة العربي المنعقد في الرياض 1428هـ 2007م الذي يؤكد ضرورة الاهتمام باللغة العربية، وأن تكون هي لغة البحث العلمي والمعاملات حيث نص على ما يلي: (وجوب حضور اللغة العربية في جميع الميادين، بما في ذلك وسائل الاتصال، والإعلام، والإنترنت وغيرها).

ثانياً: «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية» في المملكة العربية السعودية التي انبثق عنها اعتماد إحدى عشرة تقنية إستراتيجية هي: المياه، والبترول والغاز، والبتروكيميائيات، والتقنيات المتناهية الصغر (النانو)، والتقنية الحيوية، وتقنية المعلومات، والإلكترونيات والاتصالات والضوئيات، والفضاء والطيران، والطاقة، والمواد المتقدمة، والبيئة.

ثالثاً: مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي التي تفعِّل أيضاً ما جاء في البند أولاً عن حضور اللغة العربية في الإنترنت، حيث تهدف إلى إثراء المحتوى العربي عبر عدد من المشاريع التي تنفذها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية بالتعاون مع جهات مختلفة داخل المملكة وخارجها. ومن هذه المشاريع ما يتعلق برقمنة المحتوى العربي القائم على شكل ورقي وإتاحته على

شبكة الإنترنت، ومنها ما يتعلق بترجمة الكتب الهامة، وبخاصة العلمية، مما يساعد على إثراء المحتوى العلمي بالترجمة من اللغات الأخرى إلى اللغة العربية بهدف تزويد القارئ العربي بعلم نافع مفيد.

تشتمل السلسلة على ثلاثة كتب في كل من التقنيات التي حددتها «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية». واختيرت الكتب بحيث يكون الأول مرجعاً عالمياً معروفاً في تلك التقنية، ويكون الثاني كتاباً جامعياً، والثالث كتاباً عاماً موجهاً إلى عامّة المهتمين، وقد يغطي ذلك كتاب واحد أو أكثر. وعليه، تشتمل سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة على ما مجموعه ثلاثة وثلاثين كتاباً مترجماً، كما خُصّص كتاب إضافي منفرد للمصطلحات العلمية والتقنية المعتمدة في هذه السلسلة كمعجم للمصطلح.

ولقد جرى انتقاء الكتب وفق معايير منها أن يكون الكتاب من أمهات الكتب في تلك التقنية، ولمؤلفين يشهد لهم عالمياً، وأنه قد صدر بعد عام 2000، وأن لا يكون ضيِّق الاختصاص بحيث يخاطب فئة محدودة، وأن تكون النسخة التي يترجم عنها مكتوبة باللغة التي ألّف بها الكتاب وليست مترجمة عن لغة أخرى، وأخيراً أن يكون موضوع الكتاب ونهجه عملياً تطبيقياً يصبّ في جهود نقل التقنية والابتكار، ويساهم في عملية التنمية الاقتصادية من خلال زيادة المحتوى المعرفي العربي.

إن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية سعيدة بصدور هذه المجموعة من الكتب، وأود أن أشكر المنظمة العربية للترجمة على الجهود التي بذلتها لتحقيق الجودة العالية في الترجمة والمراجعة والتحرير والإخراج، وعلى حسن انتقائها للمترجمين المتخصصين، وعلى سرعة الإنجاز، كما أشكر اللجنة العلمية للمجموعة التي أنيط بها الإشراف على إنجازها في المنظمة وكذلك زملائي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذين يتابعون تنفيذ مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي.

الرياض 20/ 3/ 1431 هـ

رئيس مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

د. محمد بن إبراهيم السويل

تمهيـد

لهذا الكتاب غرض مباشر هو إطلاعك على الفكرة الكاملة للعلم والتِقانة النانويين اللذين يضمّان تصنيع المادة وفَهْمها في سلَّم المقاسات الأساسي الذي تعمل الطبيعة عنده، أي السلَّم الجُزَيئي. يقع العلمُ النانوي عند تقاطع العلم والهندسة المعتادين مع الميكانيك الكمومي والسيرورات الجوهرية للحياة نفسها. وتنطوي التِقانة النانوية على الكيفية التي نسخِّر بها معرفتنا بالعلم النانوي لتكوين الموادّ وصنع الآلات والتجهيزات التي سوف تغيِّر طرائق حياتنا وعملنا تغييراً جوهرياً.

يُعتبر العلم والتِقانة النانويان اثنين من أسخن حقول العلم والأعمال والأخبار اليوم. والقصد من هذا الكتاب هو مساعدتك على فهم كليهما. ويتطلب ذلك صرف نحو ست ساعات من بَعد ظهر يوم أحد هادئ على قراءته، أو يمكنك قراءته أثناء رحلة بالطائرة من بوستون إلى لوس أنجلوس. ونأمل أن تستمتع أثناء ذلك بهذه الجولة التقديمية للعلم والتِقانة النانويين، وبما ينطويا عليه من منافع لاقتصادنا وحياتنا.

كرَّسنا الفصلين الأوّل والثاني لفكرة العلم والتِقانة النانويين الكبرى، ولتعريفيهما وآفاقهما الواعدة. وعرضنا في الفصلين الثالث والرابع للعلم اللازم لفهم التِقانة النانوية، ولكن يمكنك تجاوزهما إذا كنت تتذكر بعض علوم ورياضيات المدرسة الثانوية. ويمثِّل الفصل الخامس جولة سريعة واسعة في بعض المجالات التخصصية من خلال الزيارات المخبرية. أما الفصول من السادس حتى التاسع فتشكِّل جوهر الكتاب. فهي تتعرَّض لمجالات تخصُّصية يتركَّز فيها العلم والتِقانة النانويان، وتشتمِل في ما تشتمِل على الموادّ الذكية والمُحِسَّات والبنى الحيوية والإلكترونيات والبصريات. ونناقش في الفصلين العاشر والحادي عشر تطبيقات التِقانة النانوية في مجال الأعمال وعلاقتها بأفراد المجتمع. ونُنْهي الكتاب

بقائمة لمصادر معلومات أخرى عن التِقانة النانوية، وعن مستثمرين صناعيين عبَّروا عن اهتمامهم بالتِقانة النانوية، إضافة إلى ثَبْتٍ تعريفيٍّ لمصطلحات التِقانة النانوية الأساسية. وإذا كنت ترغب في مناقشة التِقانة النانوية، أو في العثور على مزيد من المصادر عنها، يمكنك زيارة الموقع www.nanotechbook.com.

نشكر كثيراً من زملائنا على أفكارهم وتحفيزهم، وعلى الصور التي زوَّدونا بها. ونشكر نانسي وستاسي وجنيفييف على تحريرهن وتشجيعهن ودعمهن لنا. ويشكر مارك راتنر طلابه، من آري حتى إميلي، وزملاءه والمحكَّمين وهيئات التمويل (ولاسيّما وزارة الدفاع الأميركية وهيئة العلوم القومية) لتمكينهم إياه من تعلُّم شيء عن سلَّم المقاسات النانوية. ويتقدم دان راتنر بالشكر إلى مساعديه، وبخاصة جون وطاقم Snapdragon الذي يُعدُّ أقوى فريق عمل يمكن تخيُّله، وإلى راي على توجيهاته. ويشكر المؤلفان أيضاً برنارد وآنّ ودون وسارا وجميع الآخرين لدى Prentice Hall الذين أخرجوا هذا الكتاب إلى الوجود.

لقد استمتعنا بالكتابة، ونأمل أن تستمتعوا بالقراءة.

1 ـ مقدمة للنانو

«التِقانة النانوية هي حقا بوّابة مفتوحة على عالم جديد حقاً».

ريتا كولوِلّ Rita Colwell

مديرة هيئة العلوم القومية National Science Foundation .

■ لماذا الاهتمام بالنانو؟ 16

■ من يجب أن يقرأ هذا الكتاب؟ 18

■ ما هو النانو؟ تعريف 20

■ ملاحظة عن واحدات القياس 24

لماذا الاهتمام بالنانو؟

خلال الأعوام القليلة الماضية تسلّلت كلمة صغيرة، ذات إمكانات كبيرة، بسرعة إلى وعي الناس. تلك الكلمة هي «نانو nano». واستحضرت الكلمة تكهُّنات عن تغيُّر زلزالي في كل جوانب العلم والهندسة تقريباً مع ما ينطوي عليه ذلك من جوانب تخصّ الأخلاق والاقتصاد والعلاقات الدولية والحياة اليومية، وحتى إدراك البشرية لموقعها في الكون. ورأى فيها المتفائلون ترياقاً لكل مشكلاتنا. واعتبرها المتشائمون الخطوة التالية نحو الأسلحة الكيميائية والحيوية، ولعلّها الحالات المتطرفة، فرصة للناس لتكوين أجناس يمكن أن تحل في النهاية محل البشرية.

ومع أنه من الصعب تصديق بعض تلك الآراء، يبدو أن النانو قد ولَّدت جدلاً شعبياً وسياسياً وإعلامياً على غرار ما حصل بخصوص السفر إلى الفضاء والإنترنت في أيام انطلاقتهما الأولى. ولقد أنفقت الحكومة الأميركية حوالى 422 مليون دولار على بحوث النانو في عام 2001، وتقرّر إنفاق أكثر من 600 مليون دولار على برامج النانو في عام 2002، برغم أن الموازنة المطلوبة لا تزيد على 519 مليون دولار، ولعل هذا ما يجعل النانو البرنامج الاتحادي الوحيد الذي يُمنح من المال ما يفوق ما طُلب أثناء حقبة من الركود الاقتصادي العام. وتُعتبر بحوث النانو أيضاً من القطاعات النامية التي تموِّلها الحكومة الأميركية وغير المقتصرة حصراً على الدفاع ومكافحة الإرهاب، وإنْ كانت تنطوي على جوانب هامة للأمن القومي.

تأتي الأموال الاتحادية المخصَّصة لبحوث النانو من مجموعات متنوِّعة، منها هيئة العلوم القومية ووزارة العدل والهيئة القومية للصحة ووزارة الدفاع ووكالة حماية البيئة ومجموعة أخرى من الوزارات والوكالات الحكومية. ويتجلّى القبول الواسع للتِقانة النانوية في حقيقة أنها تتمتع بدعم سياسي من قِبَل الجمهوريين والديموقراطيين. وكان السيناتور جوزيف ليبرمان Joseph Lieberman ورئيس مجلس النواب السابق نيوت غينغريش Newt Gingrich، من أكثر المدافعين عن تِقانة النانو. وكانت المبادرة القومية للتِقانة النانوية Nanotechnology Initiative من برامج عهد كلينتون القليلة التي حظيت بدعم كبير من إدارة جورج بوش.

ليست الحكومة الأميركية الهيئة الوحيدة التي تُعطي التِقانة النانوية أفضلية.

فثمة العشرات من الجامعات في العالم، من جامعة نورثوِسترن Northwestern في الولايات المتحدة حتى جامعة دلفت Delft التقانية في هولندا ومركزِ العلوم النانوية القومي في بكين بالصين، تبني كلّيات ومرافق جديدة، وتشكِّل فرق بحث للتِقانة النانوية. وتشتمل بحوث النانو على كل التخصّصات العلمية. ويُقبِل الكيميائيون وعلماء الأحياء والأطباء والفيزيائيون والمهندسون وعلماء الحاسوب بحماس على تطوير التِقانة النانوية.

ويُعدُّ حقل التِقانة النانوية واحداً من مجالات الأعمال التجارية والصناعية الكبرى. فهيئة العلوم القومية تتوقَّع أن تمثِّل السلع والخدمات ذات الصلة بالتِقانة النانوية سوقاً تصل قيمته حتى 1 تريليون دولار بحلول عام 2015، وهذا ما يجعلها أكبر من كل صناعات الاتصالات وتِقانة المعلومات مجتمعة في بداية عهد ازدهارها في عام 1998، وليس واحدة من أسرع الصناعات نمواً في التاريخ فحسب. وتمثِّل التِقانة النانوية بالفعل أفضلية لشركات تقانية من قبيل HP وNEC وIBM التي أقامت مرافق بحث ضخمة لدراسة وتطوير التجهيزات النانوية. وبرغم ضخامة هذه الشركات الواسعة الشهرة ذات الأسماء المختصرة فإنها ليست الوحيدة القادرة على ذلك. فثمة عدد من الشركات الجديدة والصغيرة التي تهرول للمشاركة في اللعبة النانوية أيضاً. وثمة أيضاً رؤوس أموال استثمارية، ومعارض تجارية، ومجلاّت دورية قيد الظهور لدعمها. حتى إن ثمة دليلَ أسهمٍ stock index لشركات عمومية تعمل في التِقانة النانوية.

وفي وسائل الإعلام، هيمنت التِقانة النانوية على العناوين الرئيسية لدى CNN وMSNBC، وفي كل مجلة تقانية وعلمية وطبية تقريباً تظهر على الإنترنت. ومُنِحت جائزة نوبل عدة مرّات لعاملين في البحوث النانوية، وأُحدِثت جائزة فينمان Feynman Prize(*) لتقدير إنجازات علماء النانو. واعتبرت مجلة العلوم *Science* أحد المنجزات النانوية واحداً من الفتوحات العلمية لعام 2001. واحتل النانو غلاف مجلة **فوربس** *Forbes* في تلك السنة تحت العنوان الفرعي «الفكرة العظيمة التالية». واحتلت التِقانة النانوية أيضاً صفحات منشورات ذات توجّهات مستقبلية من قبيل المجلة *Wired Magazine*، وشقّت طريقها إلى روايات الخيال العلمي، وكانت موضوع حلقات من مسلسل **مسيرة النجوم: الجيل التالي** Star Trek: The Next

(*) ريشارد فيليبس فينمان Richard Philips Feynman، فيزيائي أميركي (1918 ـ 1988) حائز على جائزة نوبل للفيزياء عام 1965 (المترجم).

Generation وملفات X The X-Files، إضافة إلى فيلم **سبيادرمان** *Spiderman*.

وفي غمرة كل هذا الضجيج والنشاط انتقلت التِقانة النانوية من عالم المستقبل إلى عالم الحاضر. فقد أدّت ابتكارات في مجالات ذات صلة بالتِقانة النانوية فعلاً إلى اختراعات اقتصادية مثيرة، امتدت من إضافات إلى وقود الصواريخ تجعله سريع الاشتعال حتى علاجات جديدة للسرطان، مروراً بكواشف عالية الدقة وسهلة الاستعمال لكشف العوامل الحيوية الخطرة التي من قبيل الجمرة الخبيثة. ونزلت مراهم الجلد والسوائل النانوية الصادّة لأشعة الشمس إلى الأسواق فعلاً، وظهرت كُرات التنس المحسَّنة نانوياً، التي ترتد إلى مسافات أبعد، في مباريات كأس ديفيس Davis Cup في عام 2002. لكن ما زالت شركات كثيرة تدّعي حتى الآن أنها شركات تِقانة نانوية منغمسة في البحث أو تحاول تسويق نفسها من خلال الإعلان، بدلاً من العمل على تقديم منتَج نانوي حقيقي، مع وجود استثناءات بالتأكيد. وليس ثمة نقص في الآراء عن الوجهة التي يمكن للتِقانة النانوية أن تتّخذها، أو عمّا يمكن أن تعنيه، لكنّ كلاًّ من أنصارها ومعارضيها يوافقون على نقطة واحدة: مهما كانت رؤيتك وحرفتك واهتماماتك فإن هذا العلم ينطوي، مع التقانات المتفرعة عنه، على إمكانات سوف تؤثّر فيك تأثيراً عظيماً.

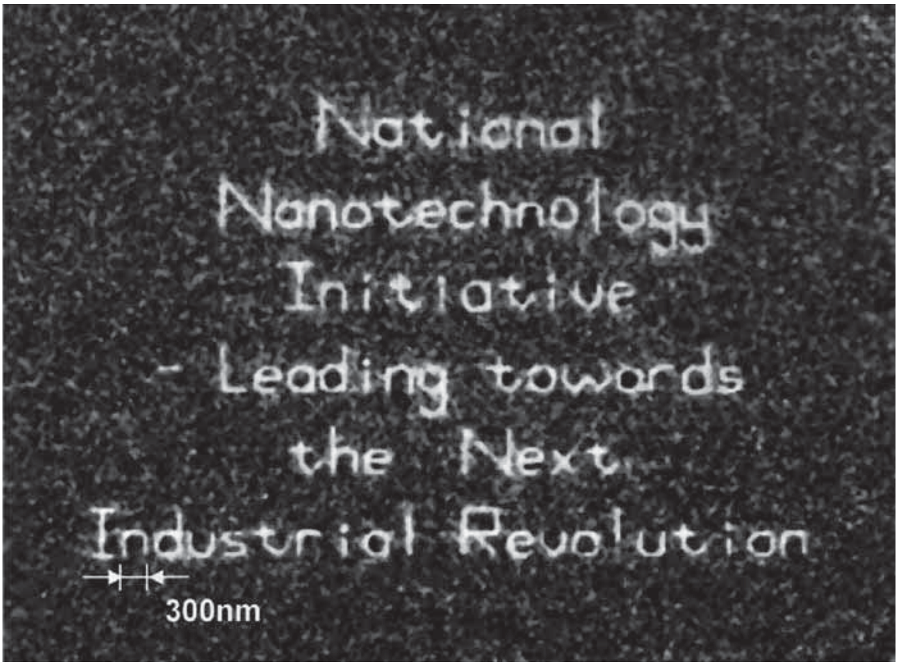
وثمة أيضاً كثير من الشائعات والأفكار الخاطئة عن التِقانة النانوية ولا تقتصر التِقانة النانوية على الروبوتات الضئيلة التي قد تسيطر على العالم يوماً ما بل هي، من حيث الجوهر، خطوة كبرى للعلم نحو الأمام. والمبادرة القومية للتِقانة النانوية تسمّيها «الثورة الصناعية القادمة»، وهذه جملة طُبِعت على سطح أصغر من عرض شعرة الإنسان بأحرف يساوي عرض كل منها 50 نانومتراً (انظر الشكل 1 ـ 1).

وبسبب الجدل الدائر حول مزايا ومثالب التِقانة النانوية على الجميع أن يعرفوا قليلاً عنها. ويطمح هذا الكتاب إلى تحقيق هذا الهدف ويقدّم عرضاً لآخر ما تُوُصِّل إليه ولبعض الأفكار عن الوجهة التي سوف تنحو التِقانة النانوية نحوها خلال السنوات القليلة القادمة.

من يجب أن يقرأ هذا الكتاب؟

صُمِّم هذا الكتاب ليكون مدخلاً لغير المختصين بالنانو إلى الحقول المثيرة

في التِقانة والعلم النانويين. وهو موجَّه مباشرة إلى القارئ المثقف الذي سمع ضوضاء كثيرة عن تِقانة النانو ويرغب في معرفة ما تعني. والكتاب يهتمّ في المقام الأول بعلم وتِقانة النانو ومضامينهما ومستقبلهما، إضافة إلى بعض الجوانب الاقتصادية والخاصة بالأعمال التي جرى عرضها باختصار. وكل ما يلزم من العلم لفهم هذا الكتاب جرت مراجعته في الفصل الثالث. وإذا كنت قد اتبعت دورة كيمياء أو فيزياء في المدرسة الثانوية أو الجامعة فسوف تكون الأمور مألوفة لك.



الشكل 1 ـ 1: صورة لبُنية نانوية تتضمن النص التالي: المبادرة القومية للتقانة النانوية التي سوف تؤدي إلى الثورة الصناعية التالية

اقتُبست الصورة بعد موافقة **مجموعة ميركين لدى جامعة نورثوسترن**.

وقد حاولنا جعل النص قصيراً، وأدرجنا مصادر خارجية لتستعين بها، إذا ما رغبت في التعمُّق في المواضيع التي قد تثير اهتمامك. وحاولنا أيضاً تقديم المفردات الأساسية لمساعدتك على فهم ما تقرأ في وسائل الإعلام والتغطية الصحفية التجارية للتِقانة النانوية، مع الإبقاء على هذا الكتاب سهل التناول

والقراءة. وأشرنا إلى المصطلحات المفتاحية حين تعريفها أول مرة، وأضفنا إلى الكتاب ثبتاً تعريفياً في نهايته.

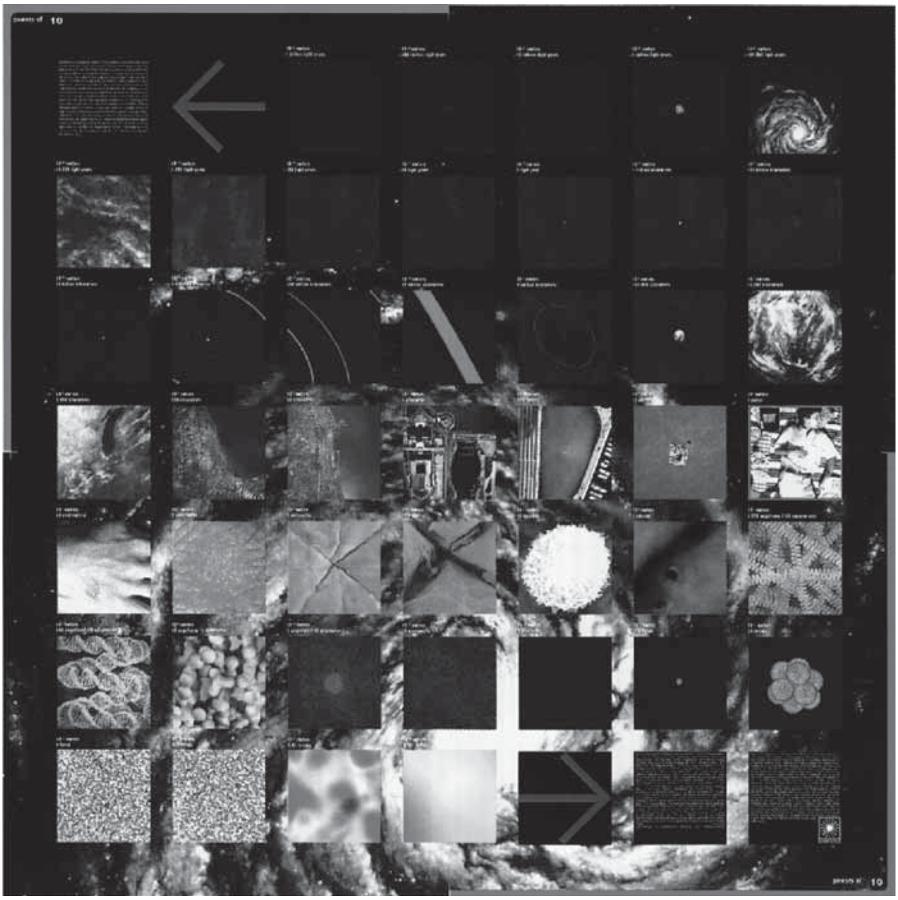
نأمل أن يكون الكتاب قابلاً للقراءة السريعة، أثناء رحلة جويّة أو أثناء استلقائك على حافّة حوض السباحة، وأن يثير اهتمامك بالتِقانة النانوية ويمكّنك من مناقشتها مع أصدقائك وإمتاع ضيوفك أثناء وليمة العشاء القادمة. سوف تكون التِقانة النانوية في مركز العلم والتِقانة والأعمال الصناعية والتجارية طوال السنوات القليلة القادمة، ولذا يجب أن يعرف الجميع قليلاً عنها. وقد صمَّمنا هذا الكتاب ليكون البداية. استمتع به!

ما هو النانو؟ تعريف

عندما خطا نيل آرمسترونغ Neil Armstrong على أرض القمر، وصف تلك الخطوة بأنها خطوة صغيرة للفرد وقفزة هائلة للجنس البشري. وقد تكون التِقانة النانوية قفزة هائلة أخرى للجنس البشري، لكنْ بخطوة صغيرة تجعل آرمسترونغ يبدو مقارنة بها بحجم المنظومة الشمسية.

تعني الكلمة «نانو» جزءاً واحداً من مليار جزء. ويساوي النانومتر الواحد 1/000000000 من المتر، أي ما يقارب الـ 1/000000000 من الياردة. ولتكوين إحساس بسلَّم المقاسات النانوية نُشير إلى أن قُطْر شعرة الإنسان يساوي 50000 نانومتر، ويبلغ قُطر خلِيّة جرثومة بضع مئات من النانومترات، ويساوي عرض أصغر خطوط الأشكال المحفورة الشائعة في شرائح الدارات المتكاملة المكرويّة في عام 2002 نحو 130 نانومتراً. وتبلغ أبعاد أصغر الأشياء المرئية بالعين البشرية المجرّدة 10000 نانومتر. ويبلغ مقاس عَشر ذرّات هدروجين مصطفَّة في خط مستقيم نانومتراً واحداً. حقاً، إن النانومتر صغير جداً (انظر الشكل 1 ـ 2).

وعلم النانو، بأبسط تعاريفه، هو دراسة المبادئ الأساسية للجُزَيئات والبنى التي يوجد فيها بُعدٌ واحد على الأقل يقع مقاسه بين 1 و100 نانومتر. وقد سُمِّيت هذه البنى، على نحو غير موفَّق، بالبنى النانوية. و**التِقانة النانوية** هي استعمال تلك البنى النانوية في تجهيزات مفيدة نانوية الأبعاد. على أن هذا التعريف ليس جذاباً أو مُرْضياً تماماً، وهو بالتأكيد ليس التعريف الذي يفسّر الضجة القائمة. فلتفسير النانو من المهم أن نفهم أن السلَّم النانوي ليس صغيراً فحسب، بل هو نوع خاص من الصِّغَر.



الشكل 1 ـ 2: تبيِّن هذه الصورة المقاسات في السلَّم النانوي مقارنة ببعض الأشياء المألوفة لنا. كل لوحة مكبَّرة بمقدار عشر مرّات من اللوحة التي تسبقها. ووفقاً لما تراه، يساوي فرق المَقاس بين النانومتر والشخص فرقَ المَقاس نفسه تقريباً بين الشخص ومدار القمر

الحقوق محفوظة لـ: *Lucia Eames/Eames Office* (www.eamesoffice.com).

كلّ شيء تقلّ أبعاده عن النانومتر هو مجرّد ذرّة حرّة أو جُزَيء صغير يجول في الفضاء على شكل قطرة بخار خفيفة. لذا فإن البنى النانوية ليست مجرد أشياء أصغر من أي شيء صنعناه من قبل، بل هي أصغر الأشياء الصلبة التي يمكن صنعها. يُضاف إلى ذلك أن السلَّم النانوي فريد من حيث كونه سلَّم المقاسات الذي تلتقي عنده خواصّ الموادّ المعتادة في الحياة اليومية،

ومن أمثلتها الناقلية والقساوة ونقطة الانصهار، بالخواصّ الغريبة للعالم الذرّي والجُزَيئي، ومنها المثنوية الموجية الجُسيْمية والمفاعيل الكمّومية. ففي السلَّم النانوي تعتمد أكثر خواص الموادّ والآلات جوهرية على مقاساتها بطريقة تختلف عن اعتمادها عليها في سلالم المقاسات الأخرى. من ذلك على سبيل المثال أن سلك أو مكوِّن دارة نانوي لا يخضع بالضرورة لقانون أوم الذي يمثِّل المعادلة المبجَّلة التي تقوم عليها الإلكترونيات الحديثة. إذ إن قانون أوم يربط بين التيار والجهد والمقاومة، لكنه يعتمد على مفهوم الإلكترونات المتدفقة على طول سلك كتدفُّق الماء على طول نهر. لكنّ هذا لا يكون ممكناً عندما يكون عرض السلك هو عرض ذرّة واحدة فقط، بل عليها عبور السلك واحداً تلو الآخر.

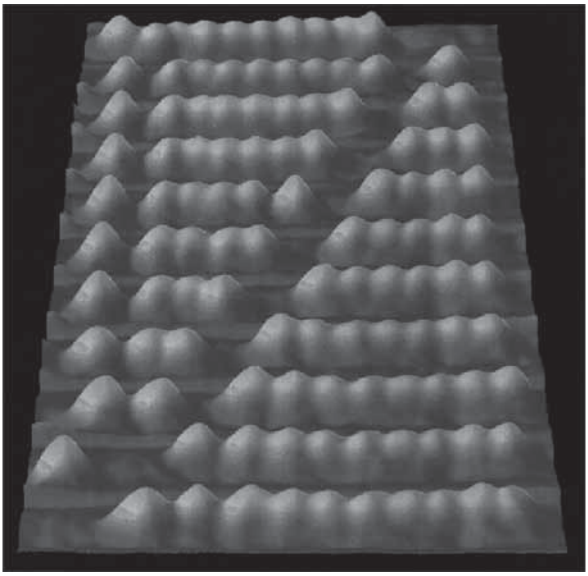
إن ارتباط المقَاس هذا بأكثر خواص الموادّ الكيميائية والكهربائية والفيزيائية جوهرية هو مفتاح العلم النانوي ونرى أن التعريف المقتضب، الصحيح والجيد، للعلم والتِقانة النانويين الذي يُعبِّر عن خواصّ السلَّم النانوي المميَّزة هو الوارد في وثيقة لهيئة العلوم القومية كتبها مايك روكو Mike Roco وصدرت في عام 2001:

النانومتر الواحد (جزء من مليار جزء من المتر) هو نقطة سحرية في سلَّم الأبعاد. تقع البنى النانوية عند تقاطع أصغر التجهيزات التي من صُنع الإنسان وأكبر جُزَيئات الكائنات الحية. ويُقصد هنا بالعلم والهندسة النانويين الفهم الجوهري والتطورات التقانية الناجمة عن استغلال خواص فيزيائية وكيميائية وحيوية جديدة لمنظومات متوسطة في مقاساتها بين الذرّات والجُزَيئات المنفصلة والموادّ الجَسِيمة، حيث يمكن التحكُّم بالخواص الانتقالية في ما بين الحدَّيْن.

صحيحٌ أن حقل التِقانة النانوية، وأخاه حقل المنظومات الإلكتروميكانيكية المكروية MEMS الأشد تعقيداً، يتعاملان مع الأشياء الصغيرة جداً، إلا أنه يجب عدم الخلط بينهما. فعلماء ومهندسو المنظومات الإلكتروميكانيكية المكروية يهتمون بروبوتات صغيرة جداً ذات أذرع تداول تستطيع فعل أشياء من قبيل الحركة ضمن تيار الدم ونقل الدواء وإصلاح النُسُج. ويمكن أن تكون ثمة تطبيقات كثيرة أخرى لتلك الروبوتات الضئيلة أيضاً، منها تصنيع وتجميع وإصلاح منظومات أكبر.

إن المنظومات الإلكتروميكانيكية المكروية مستعملة فعلاً في قدح آليّات وسائد الحماية الهوائية في السيارات وفي تطبيقات أخرى. لكن وجود بعض التقاطعات بين هذه المنظومات والتِقانة النانوية لا يعني أنها مماثلة لها في حال من الأحوال. فأحد الاختلافات يكمن في أن المنظومات الإلكتروميكانيكية المكروية تهتم ببُنى تقع مقاساتها بين 1000 و1000000 نانومتر، وهي مقاسات أكبر كثيراً من مقاسات السلَّم النانوي (انظر الشكل 1 ـ 3). يُضاف إلى ذلك أن العلم والتِقانة النانويين يهتمان بجميع خواص البنى التي في المجال النانوي، سواء أكانت كيميائية أم فيزيائية أم كمومية أم ميكانيكية، وهي أكثر تنوعاً وتوجد في عشرات المجالات الفرعية. وليست التِقانة النانوية روبوتات نانوية.

في الفصول القليلة التالية، سوف ننظر بمزيد من التعمُّق إلى «النقطة السحرية في سلَّم الأبعاد»، ونقدِّم ملخّصاً سريعاً لبعض العلوم الأساسية التي تقوم عليها، ثم نقوم بجولة كبيرة في مجالات وإمكانات التِقانة النانوية الكثيرة.



الشكل 1 ـ 3: المِعداد النانوي. النتوءات المنفصلة هي جزيئات كربون ـ 60، وعرض كل منها يساوي نحو نانومتر واحد

اقتُبست بعد موافقة *J. Gimzewski, UCLA*.

ملاحظة عن واحدات القياس

تُستعمل واحدات القياس المترية (الدولية SI) في كل العلم النانوي تقريباً. وقد لا يكون ذلك مُستساغاً للقراء الذين نشأوا في بيئة الثقافة الأميركية حيث لا تُستخدم المقاسات الصغرى كثيراً. ونُدرِج في ما يلي لائحة بالواحدات المترية الصغيرة للمساعدة على بناء سلَّم المقاسات مع تقدّمنا عبر عالم الصِّغريات.

الوحدة المترية الدولية (المختصر)	الوصف
متر (m)	ثلاثة أقدام أو ياردة واحدة تقريباً.
سنتيمتر (cm)	1/100 من المتر.
ميلِّيمتر (mm)	1/1000 من المتر.
مكرومتر (µm)	1/1000000 من المتر. ويُسمّى أيضاً «مكرون»، وهو سلَّم مقاسات الأشكال الداخلِيّة في معظم الدارات المتكاملة والمنظومات الإلكتروميكانيكية المكروية.
نانومتر (nm)	1/1000000000 من المتر، وهو سلَّم مقاسات الجُزَيئات الصغيرة المنفصلة والجسيْمات التي تتعامل معها التِقانة النانوية.

2 ـ مسألة الأبعاد

«في الأشياء الصغيرة نرى الجمال، وعند المقاسات الضئيلة تبلغ الحياة الكمال».

بن جونسون Ben Johnson(*)

■ **نوع مختلف من الصِّغَر** 26

■ **بعض تحدِّيات النانو** 30

(*) روائي وشاعر وممثل إنكليزي من عصر النهضة (1572 ـ 1637) (المترجم).

نوع مختلف من الصِّغَر

تخيَّل شيئاً نرغب جميعاً في اقتنائه: مُكعَّب من الذهب طول ضِلْعه يساوي 3 أقدام. خُذ المكعّب التخيُّلي وقصّه في منتصف طوله وعرضه وارتفاعه لتكوين ثمانية مكعّبات صغيرة طول ضلع كل منها يساوي 18 إنشاً (نحو 50 سنتيمتراً). إن خواصّ كل من المكعّبات الثمانية الصغيرة هي نفسها خواصّ المكعّب الكبير (باستثناء القيمة المالية): فكل منها هو ذهب أصفر لامع ثقيل. وسيبقى كل منها معدناً طرياً ناقلاً للكهرباء له نفس درجة حرارة الانصهار التي كانت له قبل القطع. وفي ما عدا أن القصّ يجعل المكعّب الذهبي أسهل حملاً فإنك لا تكون قد حقَّقت شيئاً بقصّه.

تخيَّل الآن أنك قطَّعت واحداً من المكعبات الصغيرة التي يساوي طول ضلعها 18 إنشاً بنفس الطريقة. حينئذ سوف يكون طول ضلع كل من المكعبات الثمانية الناتجة 9 إنشات، وسوف تكون له نفس الخواص التي كانت للمكعب الأصلي قبل البدء بالقطع. وإذا تابعنا قص مكعبات الذهب بنفس الطريقة وانتقلنا بالمقاس من القدم إلى الإنش، ومن الإنش إلى السنتيمتر، ومن السنتيمتر إلى الميلِّيمتر، ومن الميلِّيمتر إلى المكرون، فإننا لن نرى تغيُّراً في خواص الذهب. لكن عندما تُصبح مكعبات الذهب أصغر، وعند مرحلة معيّنة نصبح غير قادرين على رؤيتها بالعين المجردة، وتظهر الحاجة إلى بعض الأدوات الدقيقة للمساعدة على الاستمرار في القص. ومع ذلك تبقى خواص قطع الذهب الفيزيائية والكيميائية دون تغيير. وهذا واضح من خبرتنا في عالم الواقع: في سلَّم المقاسات الكبيرة لا تعتمد خواص المادة الفيزيائية والكيميائية على مقاسها، ولا فرق في ذلك، أكان المكعب من ذهب أم من حديد أو رصاص أو بلاستيك أو جليد أو نحاس.

لكن عندما نصل إلى السلَّم النانوي تتغيَّر كل الأشياء، ومنها لون الذهب ودرجة حرارة انصهاره وخواصه الكيميائية. ويكمن سبب هذا التغيُّر في طبيعة التأثيرات المتبادلة في ما بين الذرّات التي يتكوَّن الذهب منها، تلك التأثيرات التي تختفي حين توسيطها في المادة الجَسِيمة. إن الذهب النانوي لا يتصرّف كالذهب الجَسِيم.

تمثِّل الخطوات القليلة الأخيرة من القص اللازمة للوصول بمكعّب الذهب

إلى السلَّم النانوي نوعاً من أنواع **التصنيع النانوي**، أو التصنيع في سلَّم المقاسات النانوية. فقطعة الذهب التي بحجم حقيبة ملابس يوصلها القص المتتالي إلى السلَّم النانوي. وهذا النوع من التصنيع النانوي يُسمّى أحياناً بالتصنيع النانوي النزولي top down، لأننا نبدأ ببُنية كبيرة لنجعلها أصغر. وفي المقابل فإن الانطلاق من الذرّات المنفصلة، والبناء حتى الوصول إلى بُنية نانوية، يُسمّى التصنيع النانوي الصعودي bottom up. وأحياناً تُسمّى بُنى الذهب النانوية التي حضَّرناها **النقاط الكمّومية** *quantum dots* أو **النقاط النانوية** *nanodots* لأن أشكالها تشابه شكل النقطة تقريباً، ولأن مقاسات أقطارها تقع في السلَّم النانوي.

الشكل 2 ـ 1: التقانيون النانويون القدامى

اقتُبست الصورة بعد موافقة *Getty Images*.

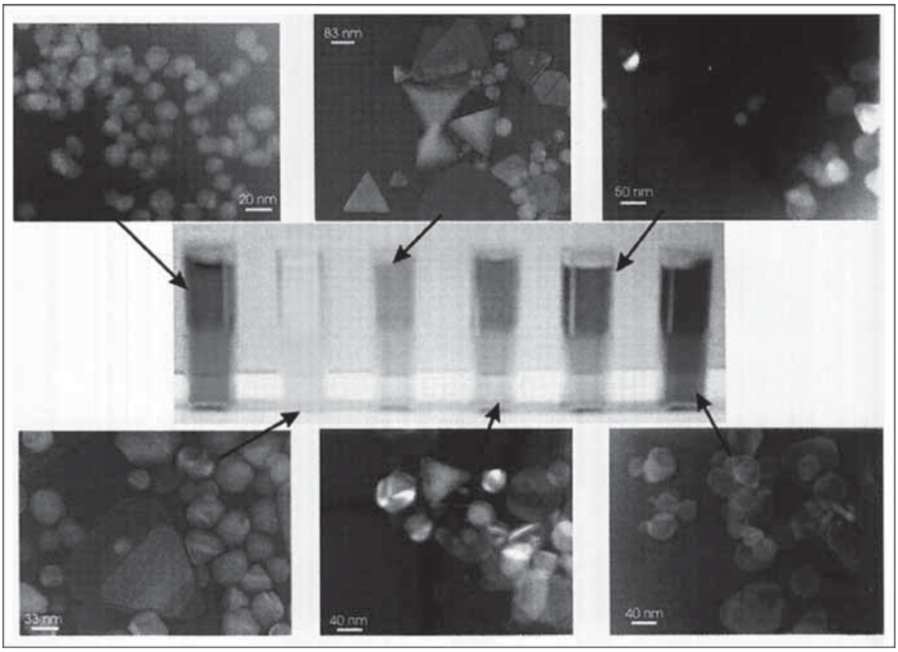
الشكل 2 ـ 2: التقانيون النانويون الحديثون

اقتُبست بعد موافقة *Getty Images*.

ليست سيرورة التصنيع النانوي، ولاسيّما صنع نقاط الذهب النانوية، بالجديدة. فكثير من ألوان النوافذ الزجاجية المبقَّعة الموجودة في كنائس العصور الوسطى والعهد الفيكتوري، وبعض الطلاءات الزجاجية التي تغطي أواني الفخار القديمة، تقوم على حقيقة أن خواص الموادّ في السلَّم النانوي تختلف عن الخواص في سلَّم المقاسات الكبيرة. وعلى وجه الخصوص، يمكن للون جُسيْمات الذهب النانوية أن يكون برتقالياً أو بنفسجياً أو أحمر أو مائلاً إلى الخضرة، تبعاً لمقاساتها. بهذا المعنى يكون التقانيون النانويون الأوائل هم أولئك

الذين عملوا في صناعة الزجاج في ورشات العصور الوسطى (الشكل 2 ـ 1)، لا العاملين ذوي الأردية الأنيقة في مصانع أنصاف النواقل الحديثة (الشكل 2 ـ 2). من الواضح أن أولئك الزجَّاجين لم يكونوا يعرفون سبب تكوُّن الألوان نتيجة لما يفعلوه، أما نحن فنعرف ذلك الآن (الشكل 2 ـ 3).

لا يمكن الإبقاء على خواص البنى النانوية التي تعتمد على المقاس حين العودة ثانية إلى سلَّم المقاسات الكبيرة. ويمكننا الحصول على انتشار كبير المقاس للنقاط النانوية الذهبية ذات اللون الأحمر بسبب مقاسات النقاط النانوية الإفرادية، إلا أن النقاط النانوية سرعان ما تبدأ بالتحول إلى اللون الأصفر حينما نبدأ بضغطها وندعها تترابط ثانية معاً. ومن حُسن الطالع أنه إذا كان ثمة ما يكفي من النقاط النانوية القريبة من بعضها إلى حد لا يكفي لترابطها فإننا نستطيع رؤية اللون الأحمر بالعين المجردة. وهذه هي آلية عملها في الزجاج وفي الطلاءات الزجاجية. لكن إذا تُركت النقاط لتتجمَّع وترتبط معاً، تعود ثانية لتصبح ذهبية كالذهب الذي يحلم به مُلاّك المصارف.



الشكل 2 ـ 3: بلّورات نانوية معلَّقة في محلول. يحتوي كل وعاء على فضة أو ذهب، وينجم اختلاف الألوان عن اختلاف المقاسات والأشكال وفق المبينَّ في البنى العليا والسفلى

اقتُبست بعد موافقة مجموعة *Richard Van Duyne, Northwestern University*.

لفهم سبب حدوث ذلك يعتمد علماء النانو على معلومات من تخصُّصات أخرى. فالكيميائيون يهتمون عموماً بالجُزَيئات. وتتّصف الجُزَيئات الهامة بمقاسات مميِّزة يمكن أن تُقاس في السلَّم النانوي ذاته: فهي أكبر من الذرّات وأصغر من البنى المكروية. ويهتم الفيزيائيون بخواص المادة، ونظراً إلى أن خواص المادة في السلَّم النانوي تتغيَّر بسرعة ويمكن التحكُّم في مقاساتها غالباً، تُعتبر فيزياء السلَّم النانوي مصدراً هاماً للمعلومات. ويهتم المهندسون بفهم واستعمال الموادّ النانوية المقاس. ويتعامل علماء الموادّ ومهندسو الكهرباء والكيمياء والميكانيك جميعاً مع الخواص الفريدة للبنى النانوية، ومع كيفية استعمال تلك الخواص في صنع موادّ جديدة كلياً يمكن أن توفِّر إمكانات جديدة في الطب والصناعة والترفيه والبيئة.

لذا يمكن لتعدُّد تخصُّصات التِقانة النانوية أن يُفسِّر سبب استغراقها مدة طويلة كي تتطور. فمن غير المألوف أن يتطلَّب تخصُّصٌ واحد كل هذه الخبرات المتنوعة. وهو يفسِّر أيضاً سبب كون معظم مرافق بحوث النانو الجديدة هي نتاج لجهود تعاونية بين علماء ومهندسين من كل جزء من القوى العاملة.

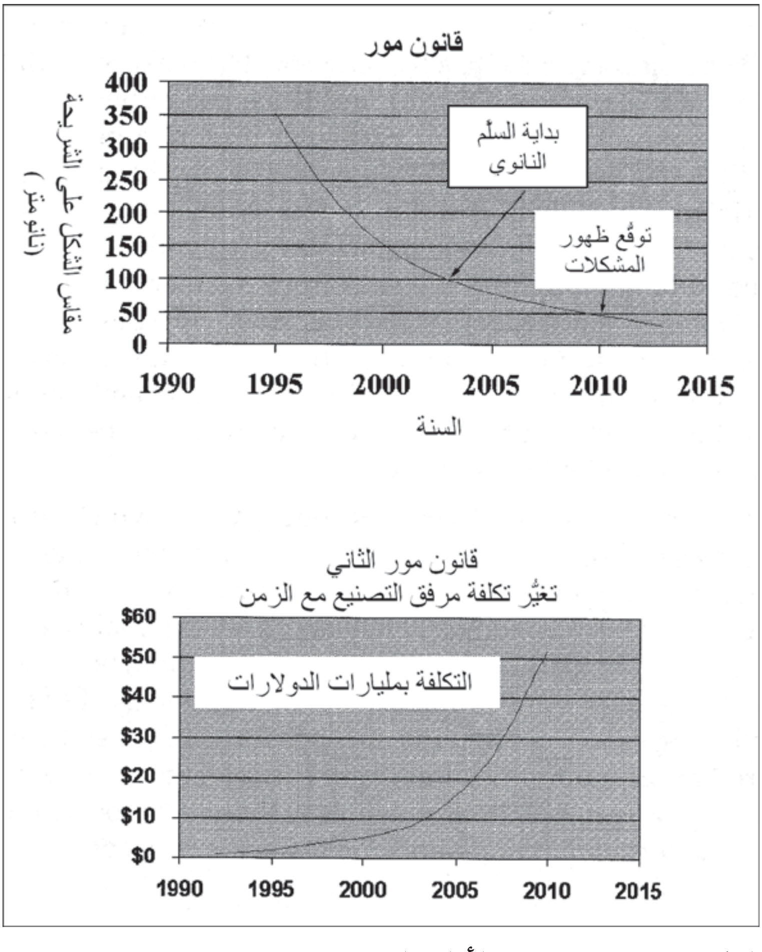
بعض تحدِّيات النانو

يتطلب العلم والتِقانة النانويان منا أن نتخيَّل الأشياء ونصمِّمها ونصنعها ونقيسها ونستعملها في السلَّم النانوي. ونظراً إلى أن السلَّم النانوي شديد الضآلة إلى حد يصعب تخيُّله، تتضح صعوبة التخيُّل والصنع والقياس والاستعمال فيه. فلِمَ الاهتمام به؟

من وجهة نظر العلم الأساسي، يُعتبر السلَّم النانوي هاماً إذا أردنا فهم بُنية المادة وكيفية تعبير خواصّها عن مكوِّناتها وتراكيبها الذرّية وأشكالها ومقاساتها. أما من وجهة نظر التِقانة والتطبيقات، فتعني الخواص الفريدة للسلَّم النانوي أن التصميم النانوي يمكن أن يُعطي نتائج لا يمكن الحصول عليها بطرائق أخرى.

لعلّ أهمّ التطوّرات التقانية في النصف الثاني من القرن العشرين كان اختراع إلكترونيات السليكون. فقد تحقَّقت الشرائح المكروية، وتطبيقاتها الثورية في الحَوْسَبة والاتصالات والإلكترونيات الاستهلاكية والطب وغيرها بفضل تطوير تِقانة السليكون. في عام 1950، كان التلفزيون غير ملوّن، وكان صغيراً ومحدوداً وغير موثوق، وكانت صورته مغبَّشة. وكان ثمة أقل من عشرة

حواسيب في جميع أنحاء العالم، ولم يكن هناك هاتف خلوي وساعات رقمية وألياف ضوئية وإنترنت. لكن بفضل الشرائح المكروية، تحقَّقت كل تلك التطورات مباشرة، وأدّى استمرار تزايد وثوقية إلكترونيات السليكون وتناقص تكلفتها إلى أن أصبحت الحواسيب أفضل وأرخص، وأصبحنا نستطيع تحمُّل تكاليف كل الأدوات والألعاب الحاسوبية والتجهيزات التي تحيط بنا.



الشكل 2 ــ 4: قانونا مور الأول والثاني

وخرج غوردون مور Gordon Moor، أحد مؤسِّسي شركة إنتل، بقانونين تجريبيّين لوصف التطورات المذهلة في إلكترونيات الدارات المتكاملة. ينصّ قانون مور الأول (الذي يُسمّى قانون مور للتبسيط) على أن مقدار الحيِّز اللازم

لوضع ترانزستور على شريحة يتقلَّص إلى النصف كل 18 شهراً. وهذا يعني أن الحيِّز الذي كان يتسع لترانزستور واحد قبل 15 عاماً يستطيع احتواء 1000 ترانزستور اليوم. يُري الشكل 2 ـ 4 قانون مور بيانياً، حيث يُعطي المنحني عرض خط الدارة الإلكترونية على الشريحة، ويُبيِّن تناقص المَقاس بسرعة مع مرور الوقت.

يدعو قانون مور الأول إلى السرور، أما القانون الثاني فهو مخيِّب للآمال، وإنْ كان ناجماً عن الأول، لأنه يتنبَّأ بأن تكلفة بناء معمل (أو خط إنتاج) لصنع الشرائح تتضاعف مع كل جيل شرائح جديد، أو كل 36 شهراً تقريباً.

لذا فإن منتجي الشرائح قلقون مما سوف يحصل حينما تبدأ خطوط الإنتاج بصنع شرائح تحتوي على أشكال نانوية المقاس. وما هذا لأن التكاليف سوف ترتفع إلى ما لا يستطيع حتى منتجو الشرائح الحاليون تحمُّله فحسب (التكاليف الشائعة في الواقع حالياً من رتبة عدة مليارات الدولارات للمصنع الواحد)، بل لأنه ليس ثمة من سبب يدعو إلى الاعتقاد بأن الشرائح سوف تعمل وفقاً لما هو متوقع إلا إذا جرى تطبيق منهجية تصميم جديدة كلياً، لأن الخواصّ تتغيَّر مع تغيُّر المقاسات في السلَّم المكروي. وخلال السنوات القليلة القادمة (بحلول عام 2010 وفقاً لتوقعات معظم الخبراء)، تجب إعادة النظر في جميع المبادئ الأساسية التي تقوم عليها صناعة الشرائح مع انتقالنا من الشرائح المكروية إلى الشرائح النانوية. وهذه هي المرة الأولى منذ وضع مور لقانونيه التي يتطلب فيها تصميم الشرائح ثورة، لا تطويراً. وقد هيمنت هذه القضايا على اهتمام الشركات الكبرى وجعلتها تتخبّط في البحث عن مكان لها في مستقبل الشرائح النانوية. فتجاهل تلك المسائل يشابه صنع الصّمّامات الإلكترونية المخلاَّة Vacuum tube(*) أو أسطوانات تسجيل الصوت vinyl record(**) اليوم.

(*) الصّمّام الإلكتروني هو أنبوب زجاجي مغلق، بحجم إبهام اليد تقريباً، يحتوي على فتيلة كهربائية تسخِّن ما يُسمّى مهبطاً، فتنطلق منه إلكترونات باتجاه ما يُسمّى المصعد بتأثير حقل كهربائي مطبق عليهما. ويتحكم جهد مطبق على شبكة في ما بينهما بتدفق تيار الإلكترونات. وبعد اختراع الترانزستور حلّ هذا محلّ ذلك الصمام في معظم التطبيقات (المترجم).

(**) الأسطوانة هي قرص رقيق من مادة لدنة يُسجَّل الصوت عليها ميكانيكياً بحفر مسارات دائرية حلزونية فيها ذات أعماق متناسبة من شدة الإشارة الصوتية. وحين تمرير رأس إبرة فوق المسار المحفور تهتز كاهتزازات الصوت وتحرِّك غشاء وفقاً لها فيُصدر الصوت المسجَّل. وقد بقيت الأسطوانات شائعة حتى ظهور التسجيل على الأشرطة المغنطيسية (المترجم).

وفي أحد حقول الإلكترونيات النانوية، الذي يهتم بالجُزَيئات ويُسمّى بالإلكترونيات الجُزَيئية، ثمة عدة صعوبات أخرى يأمل علماء النانو تجاوزها. فبغية الحفاظ على المنجزات الاجتماعية والاقتصادية والطبية وعلى جودة الحياة التي تحقَّقت بفضل ثورة الإلكترونيات، علينا مواجهة التحدي الكامن في العلم والتِقانة النانويين. ثمّ إن تنقيح التقانات الحالية سوف يستمر بدفعنا نحو الأمام مدة من الزمن، إلا أن ثمة عوائق سوف تظهر في المستقبل غير البعيد، والتِقانة النانوية يمكن أن توفِّر طريقة لتجاوزها. وحتى بالنسبة إلى أولئك الذين يعتقدون بأن ثمة إفراطاً في التفاؤل فإن الإمكانات الموعودة أعظم من أن يتجاهلوها.

3 ـ العلم الأساسي الكامن وراء التِقانة النانوية

■ الإلكترونات 36

■ الذرّات والشوارد 37

■ الجُزَيئات 39

■ المعادن 41

■ موادّ أخرى 42

■ المنظومات الحيوية 44

■ التعرُّف الجُزَيئي 47

■ النقل الكهربائي وقانون أوم 49

■ الميكانيك الكمّومي والأفكار الكمّومية 50

■ البصريّات 52

صحيحٌ أن هذا الكتاب موجّه إلى غير المختصين إلا أنه من المفيد مراجعة بضعة من المبادئ العلمية الأساسية قبل التوغُّل في عالم الذرّات والجُزَيئات. تأتي هذه المبادئ العلمية من الفيزياء والكيمياء وعلم الأحياء وعلم الموادّ والهندسة. وسوف نستعرض هذه المبادئ بسرعة دون محاولة التعاطي مع التعقيد والأناقة اللذين ينطوي العلم عليهما. فالمقصود من هذه المراجعة هو أن تكون جولة مريحة عبر أكثر المبادئ العلمية أهمية اللازمة لفهم السلَّم النانوي. ونَعِد بألاّ يكون ثمة سوى معادلتين فقط.

الإلكترونات

تقوم رؤية الكيميائيين للحقيقة الفيزيائية على وجود جُسَيْمَيْن أصغر من الذرّة. وهذان الجُسَيْمان هما **البروتون** و**الإلكترون** (**النترون** هو في المحصِّلة تركيب منهما). صحيحٌ أن ثمة جسيْمات دون ذرّية أخرى (كالكواركات وغيرها)، إلا أن البروتون والإلكترون يمثِّلان من بعض النواحي أبسط الجسيْمات اللازمة لوصف المادة.

اكتُشف الإلكترون في وقت مبكر من القرن العشرين، وهو خفيف جداً (أخفّ بـ 2000 من أصغر ذرّة، أي ذرّة الهدروجين)، ويمتلك شِحنة سالبة. أما البروتون، الذي يمثِّل بقية كتلة ذرّة الهدروجين، فيمتلك شِحنة موجبة. وفي حال وجود إلكترونين جنباً إلى جنب، فإنهما يؤثِّران في بعضهما البعض وفقاً لقانون القوة الكهربائية الأساسي. ويمكن التعبير عن تلك القوة بمعادلة بسيطة تُسمّى أحياناً قانون كولومب *Coulomb's law*.

عندما تفصل مسافة مقدارها r بين جُسَيْمَيْن مشحونيْن تُعطى القوة المؤثِّرة فيهما بـ: $F= Q_1Q_2/r^2$

حيث F هي القوة الفاعلة بين الجُسَيْمَيْن، وQ_1 هي شِحنة الجسَيْم الأول وQ_2 هي شِحنة الجسَيْم الثاني، وr هي المسافة بين الجسَيْميْن. لاحظ أنه إذا كان الجسَيْمان إلكترونين تكون لـ Q_1 وQ_2 نفس الإشارة (والقيمة أيضاً)، ولذا تكون القوة بينهما عدداً موجباً. وعندما تؤثِّر قوة موجبة في جسيْم فإنها تدفعه بعيداً. ولا تحبّ الإلكترونات الاقتراب من بعضها لأن «الشحنات المتشابهة تتنافر» تماماً كما يتنافر مغنطيسان متشابهان. والعكس صحيح أيضاً. إذا كان ثمة جُسَيْمان لهما شحنتان مختلفتان كانت القوة بينهما سالبة، وجذب أحدهما

الآخر. أي إن الشحنات المختلفة تتجاذب. وهذه نتيجة مباشرة لقانون كولومب.

وينتُج من قانون كولومب أيضاً أن القوة الفاعلة بين الجسيْميْن تصبح صغيرة إذا ابتعدا عن بعضهما البعض كثيراً (أي عندما تصبح r كبيرة). لذا فإن الإلكترونين المتجاورين جداً سوف يدفع كل منهما الآخر حتى تصبح المسافة الفاصلة بينهما كبيرة إلى حد يجعل قوة تنافرهما مهملة، فينعم حينئذ كلٌّ منهما بتفرُّده(*).

وحينما تتدفق الإلكترونات على شكل تيار كهربائي فإنه من المفيد وصف ما يحصل للفراغات التي تخلِّفها وراءها. تُسمّى تلك الفراغات **بالثقوب** holes. وليست الثقوب جسيْمات حقيقية، بل هي أمكنة يجب أن تكون فيها إلكترونات، والإلكترونات تحاول الوصول إليها. وتُعتبر الثقوب ذات شِحنة موجبة، لذا بإمكانك تخيُّل التيار الكهربائي على أنه مجموعة من الإلكترونات التي تنتقل من مكان فيه وفرة منها (أي من الشِحنات السالبة)، ومن أمثلته الجزء السفلي من بطارية من المقاس AA، إلى مكان فيه وفرة من الثقوب (شِحنات موجبة)، ومن أمثلته الجزء العلوي من تلك البطارية. ولتحقيق الانتقال تتدفق الإلكترونات عبر دارة خارجية حيث تؤدي عملاً مفيداً.

إضافة إلى تكوين التيارات، تُعتبر الإلكترونات مسؤولة أيضاً عن الخواص الكيميائية للذرّة التي تنتمي إليها، وفقاً لما سوف نراه في ما يلي.

الذرّات والشوارد

تتألف أبسط صورة للذرّة من نواة كثيفة ثقيلة ذات شِحنة مُوجبة، تحيط بها وتدور حولها مجموعة من الإلكترونات ذات الشِحنة السالبة (كجميع الإلكترونات). ونظراً إلى امتلاك النواة والإلكترونات شحنات مختلفة، فإن القوى الكهربائية تُبقيها معاً كما تُبقي قوة الثقالة الكواكب حول الشمس. وتمثِّل النواة معظم كتلة الذرّة، أي نحو 1999/2000 من كتلة الذرّة في حالة الهدروجين، وتصبح هذه النسبة أكبر في ذرّات أخرى.

ثمة 91 نوعاً من الذرّات في الطبيعة، ويحتوي كل نوع من هذه الذرّات في نواته على مقدار من الشِحنة يختلف من عنصر إلى آخر. وتساوي شِحنة

(*) solipsism. استعار المؤلفان هذه الصورة مجازاً من مذهب التفرُّد، وهو مذهب فلسفي يقول بأن ذات المتفرِّد هي الموجودة فقط، وأن ما سواها ليس إلا مجرد استكمال لمشهد الوجود. قد يبدو هذا المذهب غريباً مع أنه واسع الانتشار ويمارسه الكثيرون منا بوعي أو من دون وعي (المترجم).

النواة الموجبة عدد البروتونات الموجودة فيها، لذا فإن شِحنة نواة أخفّ ذرّة (وهي ذرّة الهدروجين) تساوي 1+ ، تليها ثاني أخف ذرّة (الهليوم) بشِحنة تساوي 2+ ، ثم تأتي ثالث أخف ذرّة (الليثيوم) بشِحنة تساوي 3+ . . إلخ. وأثقل ذرّة موجودة في الطبيعة هي ذرّة اليورانيوم التي تمتلك شِحنة نووية تساوي 92+ (لعلّك ظننت أنها يجب أن تساوي 91+ ، إلا أن العنصر رقم 43، أي التغنيسيوم، ليس طبيعياً، ولذا جرى حذفه من العدد الكلي). وبإمكانك رؤية كل ذلك في الجدول الدوري للعناصر.

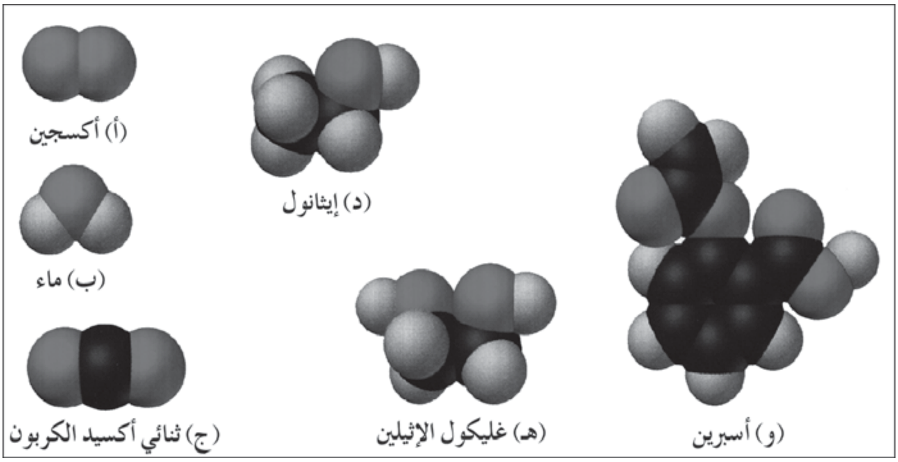
وفي الذرّات غير المشحونة، يساوي عدد الإلكترونات شِحنة النواة تماماً، أي ثمة إلكترون مقابل كل بروتون. يوجد في ذرّة الهدروجين إلكترون واحد، وفي ذرّة الهليوم إلكترونان، وفي الليثيوم ثلاثة إلكترونات، وفي اليورانيوم 92 إلكتروناً. ولمّا كانت الإلكترونات كلّها محيطة بالنواة فإن الذرّات ذات العدد الكبير من الإلكترونات سوف تكون عموماً أكبر قليلاً من ذات العدد الصغير من الإلكترونات.

وإذا كان عدد الإلكترونات غير مساوٍ لشِحنة النواة (لعدد البروتونات) كانت للذرّة شِحنة صافية، ودُعيَت الذرّة **شاردة** ion. وإذا كان عدد الإلكترونات أكبر من عدد البروتونات كانت شِحنة الذرّة الصافية سالبة، ووُصفت الشاردة بأنها سالبة. وإذا كان عدد البروتونات أكبر من عدد الإلكترونات انعكست الحالة، وكانت الشاردة موجبة. وتنزع الشوارد الموجبة إلى أن تكون أصغر قليلاً من الذرّات المحايدة ذات النواة نفسها، لأن عدد الإلكترونات فيها أقل، ولأن تلك الإلكترونات تكون أكثر تقارباً بسبب الشِحنة الصافية الموجبة. وتنزع الشوارد السالبة إلى أن تكون أكبر قليلاً من نظيراتها المحايدة بسبب إلكتروناتها الزائدة. وتساوي أقطار جميع الذرّات نحو 0.1 نانومتر تقريباً. وذرّة الهليوم هي أصغر ذرّة طبيعية، ويقارب قُطرها 0.1 نانومتر، وذرّة اليورانيوم هي أكبر الذرّات، ويقارب قطرها 0.22 نانومتر. أي إن مقاسات جميع الذرّات هي من نفس المرتبة تقريباً (ضمن عامل يساوي ثلاثة أضعاف)، وهي أصغر من مقاسات السلَّم النانوي وتقع على حافّته تقريباً.

تمثِّل الإحدى وتسعون ذرّة لبِنات البناء الأساسية لجميع معالم الطبيعة التي نراها. وما عليك إلاّ أن تتخيَّل أن ثمة 91 نوعاً من اللبِنات ذات الألوان والأحجام المختلفة التي يمكن استعمالها في بناء جدران وأبراج ومبان وملاعب مزينة. وهذا يشابه تجميع الذرّات معاً لتكوين الجُزَيئات.

الجُزَيئات

حينما تتجمَّع ذرّات ضمن بُنية ثابتة يتكوَّن جُزَيء. وتشابه طريقة البناء هذه الطريقة التي تُجمع بها أجزاء مختلفة من مجموعات ألعاب الأطفال. ومع أن عدد الأجزاء صغير فإنه يمكن بناء أي شيء تقريباً يمكن لبنَّاء أن يتخيَّله ضمن إطار بضعة القيود الفيزيائية الأساسية المفروضة على طريقة تجميع الأجزاء. وتمتلك الطبيعة، ومعها التقانيون النانويون، 91 ذرّة مختلفة لاستعمالها في البناء، جميعها كروي تقريباً، إلا أنها تختلف بأحجامها وبقابليتها للتأثير المتبادل مع الذرّات الأخرى والارتباط بها. وثمة الكثير من الجُزَيئات المختلفة التي تُعرَف الملايين منها، والتي تُكتشف المئات منها أو تُصنع كل عام. يُري الشكل 3 ـ 1 جُزَيئات تتكوَّن من عدد من الذرّات بين 2 و21 ذرّة. وتزيد أقطار الجُزَيئات المكوَّنة من 30 ذرّة أو أكثر على 1 نانومتر.



الشكل 3 ـ 1: نماذج لبعض الجزيئات الصغيرة الشائعة. تمثِّل الكرات البيضاء الهدروجين، وتمثِّل الغامقة الكربون والأكسجين

اقتُبست الصورة بعد موافقة دار النشر من المصدر: Chemistry: The Central Science, *9/e, by Brown/ LeMay/Bursten, © Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ.*

ترتبط الذرّات معاً لتكوِّن الجُزَيئات. وثمة أنواع مختلفة من الروابط الكيميائية، إلا أنها جميعاً تحصل بسبب التأثيرات المتبادلة بين إلكترونات الذرّات أو الشوارد المشارِكة. وليس صعباً أن نرى أن الشاردة الموجبة سوف تتجاذب مع شارة سالبة، على سبيل المثال. وقد رأينا فعلاً قوة التجاذب وهي

تعمل في قانون كولون. وفي الواقع، هذا هو تماماً نوع التجاذب الذي يكوِّن الروابط في ملح الطعام (كلور الصوديوم). وكسر وتكوين الروابط هما تفاعلان كيميائيان. ونظراً إلى أن الإلكترونات هي المسؤولة عن الروابط، وإلى أن التفاعلات الكيميائية هي مجرد تكوين أو تحطيم للروابط، فهذه الإلكترونات مسؤولة أيضاً عن الخواص الكيميائية للذرّات والجُزَيئات. فإذا غيَّرتَ الإلكترونات غيَّرتَ الخواصّ، وملحُ الطعام خيرُ مِثالٍ على ذلك. فكل من الصوديوم والكلور، وهما العنصران اللذان يكوِّنان الملح، سامّ للإنسان إذا تناولهما منفردين. أما إذا تناولهما مركبَّين معاً فهما آمنان ويُعطيان مذاقاً سائغاً.

والروابط هي مفتاح التِقانة النانوية. فهي تجمع الذرّات والشوارد معاً، ويمكن أن تعمل بذاتها عمل تجهيزات ميكانيكية من قبيل المفاصل والمحامل والأجزاء البنيوية للآلات النانوية المقاس. وفي حالة التجهيزات المكروية وتلك التي هي أكبر منها، يقتصر دور الروابط على كونها وسائل لتكوين الموادّ وإحداث التفاعلات. أما في السلَّم النانوي، حيث تكون الجُزَيئات نفسها هي التجهيزات، فيمكن للروابط أن تكون أيضاً من مكوِّنات التجهيزة.

لا توجد الجُزَيئات الصغيرة المنفردة عادة إلا على شكل أبخرة. وعندما تتكتَّل الجُزَيئات معاً، يمكن أن تكون ثمة تأثيرات متبادلة في ما بينها وبين الذرّات والشوارد والجُزَيئات الأخرى تماثل التأثيرات المتبادلة بين الذرّات بواسطة الشحنات الكهربائية ووفقاً لقانون كولون. لذا، ومع أن جُزَيء الماء المنفرد يكون غازاً عند درجة حرارة الغرفة مثلاً، فإنه يمكن للعدد الكبير من جُزَيئات الماء المتجمعة معاً أن تكوِّن قطرة ماء، أي سائلاً. وحين تبريد ذلك السائل إلى ما دون درجة الصفر المئوية يصبح صلباً. ويتألَّف الماء الصلب والسائل والغازي في الحالات الثلاث من نفس الجزيء، لكن الجُزَيئات تكون مرزومة معاً بطرائق تختلف باختلاف الحالة.

ويسلك كثير من الجُزَيئات الأخرى سلوكاً مشابهاً. ويكون جُزَيء ثنائي أكسيد الكربون غازاً عادة، وعندما يتجمَّع عدد كبير من تلك الجُزَيئات معاً يتكوَّن جليد جافّ. لذا فإن بعض الموادّ الصلبة يمكن أن يتكوَّن من جُزَيئات فقط. وتكون تلك الجُزَيئات صغيرة عادة ومكوَّنة من عدد من الذرّات يقل عن المئة. أما الجُزَيئات التي هي أكبر كثيراً، والتي تُسمّى البوليمرات، فهي موادّ قائمة بذاتها، وتمثِّل مفتاحاً لعلم النانو.

المعادن

إن معظم الإحدى والتسعين ذرّة الموجودة في الطبيعة يحبّ التجمُّع مع ذرّات من نوعه. وهذه ظاهرة يمكن أن تكوِّن بنى جُزَيئية ضخمة تحتوي على مليارات المليارات من الذرّات التي هي من النوع نفسه. وفي معظم الحالات تصبح هذه البنى صلبة لامعة لَدِنة تُسمّى المعادن. وفي المعادن يمكن لبعض الإلكترونات أن يغادر ذرّاته ويتحرك عبر جسم المعدن. وتؤلِّف الإلكترونات المتحرِّكة التيارات الكهربائية، ولذا تنقل المعادن الشِحنة. وتُعَدُّ الأسلاك الكهربائية وخطوط نقل الطاقة وهوائيات التلفاز جميعاً أمثلةً لتجهيزات تتحرك فيها الشحنات الكهربائية عبر بُنى معدنية.

قد يكون هذا صعب التخيُّل إلى حد ما. تخيَّل الأمر على أنه مصرِفٌ، المودِعون فيه هم الذرّات، ودولاراته هي الإلكترونات، ومبنى المصرف هو كتلة كبيرة من المادة أو جُزَيء ضخم. وأنت شخصياً تمتلك مبلغاً ما من المال، لكنه صغير مقارنة بالإطار الاقتصادي الكبير. عندما تودِع مالك في المصرِف ينضمّ إلى أموال المودعين الآخرين، وتتدفق الأموال بين المودِعين والمقترضين وفق الحاجة. وفي حالة إقراضها إلى جهة في الخارج تولِّد علاقة أعمال مع المقترض مماثلة تقريباً للرابط الكيميائي. وإذا قطعتَ صِلتك بالمصرف، فإنك تذهب لتأخذ أموالك، فتحصل على نفس المبلغ الذي كان لديك حين الإيداع، بقطع النظر عن الفائدة. يشابه التدفقُ الحر للنقد عبر هذه المنظومة المصرفية التيارَ الكهربائي الذي يتدفق عبر جسم المعدن. أما الحالة المقابلة، التي تُبقي فيها نقودك تحت وسادتك ولا يكون فيها تدفق أو تبادل حر للمال، فهي مشابهة لحالة العوازل الكهربائية، أي الموادّ غير الناقلة. قد لا يكون هذا التشبيه جيداً، إلا أنه مفيد.

يلمع معظم المعادن لأنه عندما يسقط الضوء على المعدن يتبعثر بواسطة الإلكترونات المتنقلة فيه. وتتكوَّن بعض الموادّ من نفس الذرّات غير المعدنية الخفيفة على الأرجح، ومن أمثلتها الغرافيت والفحم والألماس والكبريت الأصفر والفوسفور الأسود والأحمر. وتوصف هذه الموادّ بأنها عازلة لأنها لا تحتوي على إلكترونات حرة تنقل الشِحنة. وهي عموماً غير لامعة لعدم وجود إلكترونات حرة تعكس الضوء الذي يسقط عليها. ومع أننا لا نهتم كثيراً باللمعان نفسه فإن مقدار حرية تدفّق الإلكترونات في المادة هامّ إلى حدّ ما للتِقانة النانوية.

موادّ أخرى

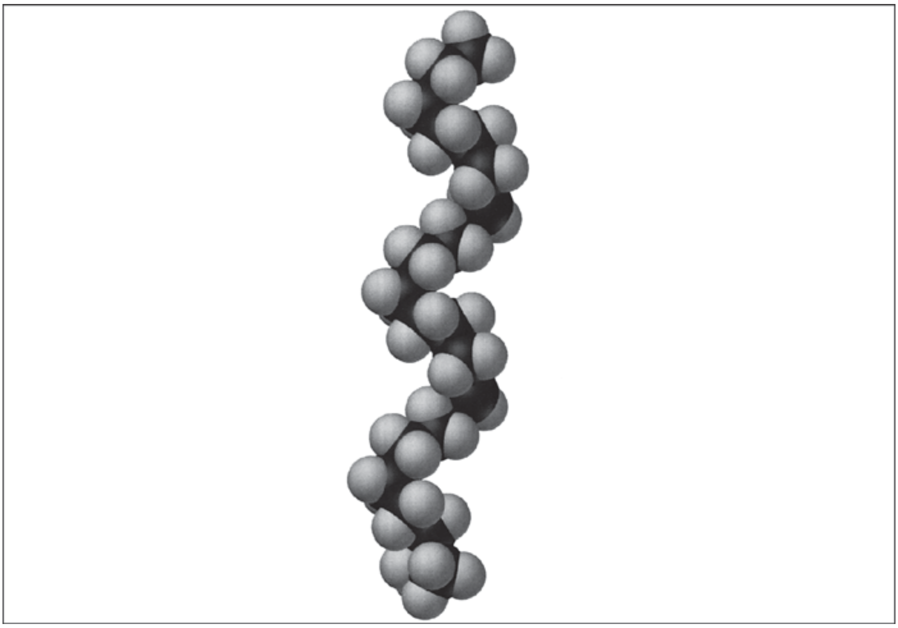
يُركِّز العلم والتِقانة النانويان اهتمامهما على الموادّ من الناحية الفيزيائية، ومن حيث كونها أجساماً صلبة. وما كان شائعاً في السابق هو تمييز علم الموادّ لثلاث فئات كبيرة من الموادّ: المعادن والبوليمرات والسيراميكات. وقد ناقشنا المعادن، وفي ما يلي سوف نلقي نظرة على الفئتين الأخريين.

إن أكثر أنواع البوليمرات شيوعاً هي اللدائن (البلاستيك plastics) التي تُسمّى أحياناً **الجُزَيئات الكبيرة** macromolecules بُغية التأكيد على أنها جُزَيئات كبيرة جداً بالمعايير الجُزَيئية (إلا أنها ليست كبيرة بما يكفي ليراها الإنسان بالعين المجرّدة). يقوم معظم البوليمرات على الكربون لأنه يتّصف بقابلية فريدة تقريباً للترابط مع نفسه. والبوليمرات هي جُزَيئات أُحادية مكوَّنة من أشكال متكررة من الذرّات (تُسمّى **المونومرات** monomers) المتصلة معاً على شكل سلسلة. وعلى سبيل المثال يوجد في كأس مصنوع من البوليستيرين polystyrene، كثير من البنى المختلفة، وتتخذ السلاسل أطوالاً مختلفة.

ويمكن للبوليمرات أن تتشابك، وهذا يعني أن سلاسل المونومرات ترتبط بسلاسل أخرى بواسطة روابط السلاسل. والبوليمرات الشديدة التشابك لا تميل إلى التصرّف كأكثر الموادّ غير المعدنية شيوعاً فقط، بل سوف تكون على الأرجح أشد صلابة أيضاً بسبب بنيتها الجاسئة. وفي طريقة أخرى، تتلافّ سلاسل البوليمر وتتشابك مثل المعكرونة الطويلة (السباغتي) أو كِبال الحاسوب مكوِّنة موادّ مطّاطية شديدة اللدانة. تُسمّى تلك الموادّ **بالبوليمرات اللامتبلورة** amorphous ويُعدُّ كلور متعدد البوليفينيل polyvinyl chloride (PVC) المستخدم في صنع الأنابيب وأشياء منزلية أخرى متنوعة مثالاً للبوليمر الشديد التشابك. والكأس المصنوع من البوليستيرين لامتبلور على الأغلب.

تمثِّل البوليمرات البسيطة، ومنها البولي إثيلين polyethelene والبوليستيرين، اللدائن الهندسية عموماً. وخلافاً للمعادن، تكون البوليمرات القائمة على الكربون عازلة على الأرجح لأن الإلكترونات تبقى مأسورة بالقرب من نوى ذرّاتها ولا تستطيع التجوال بحرية عبر المادة. واتصاف اللدائن بكونها عوازل ليِّنة هو السبب أيضاً في استخدامها في تغليف الأسلاك الكهربائية. ووفقاً لما هو متوقع، ليست اللدائن لمَّاعة، ومثالها ستارة الحمَّام المصنوعة من كلور البوليفينيل أو الحبل المصنوع من البوليبروبيلين polypropylene.

وإلى جانب البوليمرات التركيبية (الصنعية) ثمة كثير من البوليمرات الهامة في عالَم الأحياء. ومن أمثلتها شبكات العنكبوت، وجُزَيئات الدنا DNA التي تحمل المعلومات الوراثية، والبروتينات، ومتعددات السكريات polysaccharides. وسوف نناقش هذه الموادّ في المقطع التالي.



الشكل 3 ـ 2: نموذج جُزَيئي لجزء من سلسلة البولي إثيلين. يضمّ هذا الجزء 28 ذرّة كربون (غامقة)، أما البولي إثيلين التجاري فيحتوي على أكثر من 1000 ذرة كربون في الشريط الواحد

اقتُبست الصورة بعد موافقة الناشر من: Chemistry: The Central Science, *9/e, by Brown/LeMay/ Bursten, © Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ.*

لا تنقل البوليمرات الكهرباء عموماً، إلا أنه من الممكن صنع بوليمرات خاصة ناقلة. وهذا أمر هام لأن البوليمرات خفيفة وطيّعة ورخيصة ومستقرة وسهلة الصنع. ومن التطبيقات الهامة لهذه البوليمرات الاستثنائية استعمالها بدلاً من المعادن في درء تكوُّن الكهرباء الساكنة، وفي صنع الأسلاك الجُزَيئية النانوية وغيرهما.

والفئة الأخيرة من الموادّ المألوفة في علم الموادّ هي السيراميكات.

وتتكوَّن السيراميكات غالباً، وليس دائماً، من أكاسيد المعادن التي يمثِّل الأكسجين فيها أحد العناصر المكوِّنة لها. وتُصنع السيراميكات من أنواع مختلفة من الذرّات. فالصلصال على الأغلب هو أكسيد الألمنيوم، والرمل على الأغلب هو ثنائي أكسيد السليكون، والآجر هو أكسيد سليكون المغنيزيوم. وأكاسيد الكالسيوم على درجة من الأهمية في تطبيقات البلاط المألوفة. وعلى غرار البوليمرات، وخلافاً للمعادن، تبقى الإلكترونات في السيراميك محصورة ضمن ذرّاتها، ولذا لا ينقل السيراميك الكهرباء (بعض السيراميكات تصبح نواقل فائقة عند درجات الحرارة الشديدة الانخفاض). وهي عموماً غير برَّاقة، لكنها شديدة القساوة غالباً، وهشة أحياناً. وهي الآن في بداية استخدامها في التِقانة النانوية، وتبدو واعدة لتطبيقات التعويضات العظمية.

لقد ناقشنا حتى الآن أنواع الموادّ الثلاثة الشائعة في علم الموادّ، إلا أن هذه المناقشة تُهمل على ما يبدو معظم الموادّ المألوفة لنا. فالرفش الممتلئ بالتراب وصحن البيض المقلي ورغيف الخبز وغليون التدخين والخشب والألياف وأوراق الأشجار هي جميعاً بُنى غير متجانسة: فهي مصنوعة من كثير من المكوِّنات، وخواص تلك الموادّ هي تعبير عن خواص مكوِّناتها وعن الخواص الفريدة الناجمة عن مزج تلك المكوِّنات معاً. وهذه المزائج غير المتجانسة على درجة عالية من الأهمية للتطبيقات الهندسية، لكن معظمها ليس ذا أهمية في السلَّم النانوي.

المنظومات الحيويّة

يدخل كثير من الـ 91 عنصراً طبيعياً في تركيب المنظومات الحيوية. والإنسان يحتاج إلى مقادير ضئيلة من بعض المعادن، التي منها الزنك والحديد والفاناديوم والمنغنيز والسلينيوم والنحاس وجميع العناصر الأخرى المدوَّنة أسماؤها على جانب علبة الفيتامينات، لتأدية وظائف حيوية معيّنة. إلا أن ما يزيد على 95 بالمئة من أوزان معظم النباتات والحيوانات يتكوَّن من أربعة عناصر: الهدروجين والأكسجين والنتروجين والكربون. وهذه العناصر هي المهيمنة في معظم البوليمرات الصنعية أيضاً، والأسباب بسيطة جداً. فهي تستطيع تكوين روابط شديدة التنوُّع، ولذا تستعملها الطبيعة لبناء بعض البنى النانوية البالغة التعقيد لتحقيق الوظائف الحيوية، ويستطيع العلماء استعمالها لصنع موادّ جديدة. وعلى سبيل المثال، تُعتبر الجُزَيئات في أجسامنا مسؤولة

عن التنفس والهضم وتنظيم درجة الحرارة والحماية، وعن جميع الوظائف الأخرى التي يحتاج الجسم إليها. ومن الواضح أن أجسامنا تحتاج إلى تشكيلة واسعة من البنى النانوية المعقدة نسبياً لتنفيذ وظائفها الحيوية.

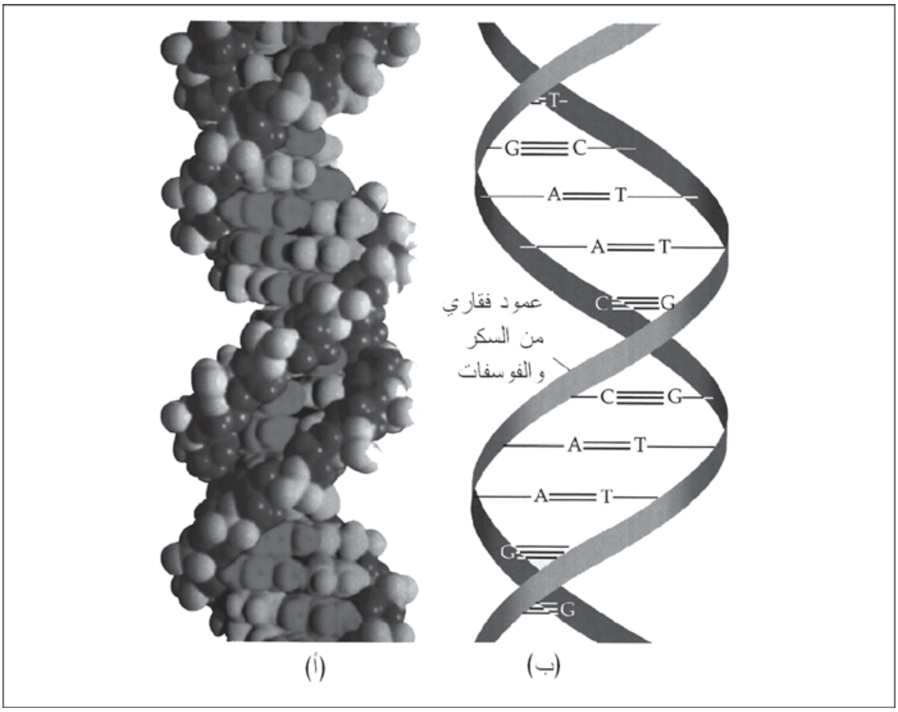
والجُزَيئات الموجودة في الطبيعة هي عموماً جُزَيئات معقّدة، ولذا تمثّل مصدراً لكثير من الرعب لطلاب الكيمياء العضوية المبتدئين. ولكي تؤدّي هذه الجُزَيئات وظائف مفيدة يجب أن تكون سهلة التجميع وسهلة التعرُّف من قِبَل جُزَيئات أخرى والارتباط بها. ويجب أن تُصنَع بسيرورات حيوية أيضاً، وأن تكون ذات خواصّ متغيِّرة. لذا ليست هذه الجُزَيئات بنى بوليمرية بسيطة التكرار كالبولي إثيلين أو البولي بروبيلين، بل هي بوليمرات غير منتظمة أشدّ تعقيداً.

ثمة أربع فئات كبيرة من الجُزَيئات الحيوية. الفئات الثلاث الأولى هي الحموض الأمينية والبروتينات والكربوهدرات، وهي جميعاً بنى بوليمرية. أما الفئة الرابعة فهي فئة المتفرّقات التي تتألف من جُزَيئات صغيرة معيّنة ذات مهامّ خاصة.

تمثِّل البروتينات معظم الكتلة الحيوية. فأظفارنا وشعرنا تتكوَّن بمعظمها من بروتين الكراتين keratin، ويحمل بروتين الهيموغلوبين hemoglobin الأكسجين في دمنا، وبروتين النتروجيناز nitrogenase مسؤول عن استخلاص النتروجين من الهواء (في العُقَد البقولية) وتحويله إلى نترات تساعد النبات على النموّ. وثمة آلاف من البروتينات، بعضهما مفهوم تماماً من حيث بنيته ووظيفته، وبعضها الآخر ما زال غامضاً. علماً بأن البروتينات هي الآلات الحيوية، أي العوامل الوظيفية التي تجعل الأحداث تحدث.

وتصنَّف الحموض الأمينية في صنفين يُسمّيان الدنا DNA والرنا RNA، وكلاهما ضروريان لصنع البروتينات. إلا أن الرنا لم يلقَ حتى الآن اهتماماً كبيراً في البنى النانوية، لذا سوف نناقش الدنا فقط. ويوضِّح الشكل 3 ـ 3 رسماً للدنا الذي يتألَّف من سكر في الخارج يحتوي على شحنات سالبة بسبب وجود ذرّات الفوسفور والأكسجين. وفي الداخل جُزَيئات صفيحية مكدَّسة بعضها فوق بعض مثل شرائح البوكر. وتتكوَّن كل شريحة من جُزَيئين صفيحيَّين منفصلين تربط بينهما على نحو ضعيف جسور بين ذرّات الأكسجين أو النتروجين من ناحية، والهدروجين من الناحية الأخرى. ونظراً إلى أن كل شريحة مثبتة من جانبيها الأيمن والأيسر، إلى كون البُنية حلزونية (لولبية)، فإن للدنا بُنية لولبية

مزدوجة كالدَرَج الحلزوني. وهي تبدو (وتعمل أيضاً إلى حد ما) مثل النابض فحينما يُلَفُّ الدنا بشدة يتراصّ على نحو لافت.



الشكل 3 ـ 3: (أ) نموذج حاسوبي للولب الدنا المزدوج. (ب) مخطط يبينّ الزوجين الأساسيين الفعليين مرتبطين معاً. تمثِّل الكرات الفاتحة الهدروجين، وتمثِّل الغامقة الكربون والأكسجين

اقتُبست الصورة بعد موافقة دار النشر من: Chemistry: The Central Science, *9/e, by Brown/LeMay/ Bursten, © Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ.*

والدنا هو جُزَيء فريد تقريباً من حيث إنه يمكن أن يكون لكل شريحة (تُسمّى زوجاً أساسياً) واحداً من أربعة تراكيب (تُسمّى AT وTA وCG وGC). وعند كل موضع من الشريط، يُمكن التحكُّم في الزوج الأساسي الذي سوف يكون موجوداً في ذلك الموضع. ذلك لأن الجُزَيئين الصفيحيَّين اللذين يكوِّنان الشريحة يمكن أن يُختارا من مجموعة من أربعة جُزَيئات فقط تُسمّى الأدنين adenine والثيمين thymine والغوانين guanine والسيتوسين cytosine التي تُختصَر بـ A وT وG وC. يرتبط A وT مع بعضهما فقط، ولا يرتبطان بـ G أو C. ويرتبط

G وC مع بعضهما فقط. وبسبب هذه القيود فإن الزوجين الأساسيين الممكنين الوحيدين هما AT وGC ومعكوساهما: TA وCG. توضع هذه التراكيب على اللولب المزدوج، وفقاً لترتيب مُعيَّن، وهي ترمِّز جميع الوظائف الحيوية. والرِّماز الجيني genetic code هو ببساطة ترتيب للأزواج الأساسية في لولب الدنا المزدوج يقرأه الرنا والبروتينات بطريقة شديدة التعقيد، وتُستعمل معلومات الرِّماز لصنع بنى حيوية قائمة على البروتينات تمثِّل أساس الحياة.

والفئة الثالثة من الجُزَيئات الكبيرة الموجودة في عالَم الأحياء هي متعددات السكّر، وهي مجرّد سكّريات مكوَّنة من جُزَيئات طويلة جداً. وهي عالية الأهمية لوظيفة الخلِيّة، وبعضها موجود في الأربطة وفي الموادّ الإنشائية الحيوية الأخرى. إلا أنه ليس لها استعمال واسع في التِقانة النانوية التركيبية.

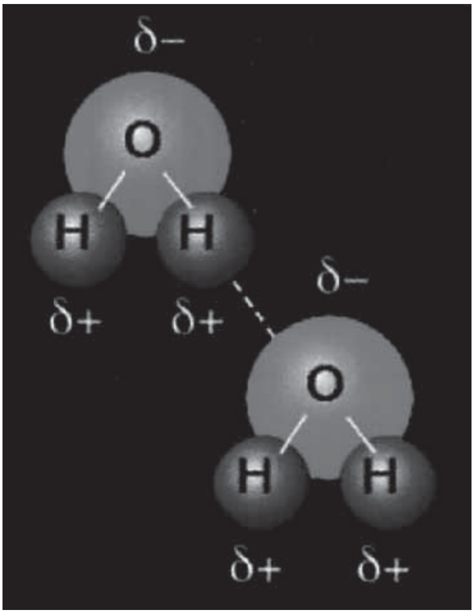
وتتألف الفئة الرابعة من الجُزَيئات الحيوية من جُزَيئات صغيرة جداً، منها الماء (الهامّ لكلّ الوظائف الحيوية تقريباً)، والأكسجين الذي يمثِّل مصدراً رئيسياً للطاقة، وثنائي أكسيد الكربون الذي يمثِّل المادة الخام لتكوين النباتات، وأكسيد النتروجين. إن أكسيد النتروجين صغير جداً، وهو يتألف من نتروجين وأكسجين مترابطين معاً، ويؤدي أدواراً حيويةً كثيرةً منها «وظيفة المراسل الثاني»، وهو كناية عن مراسل وسيط للاتصالات ضمن الخلِيّة يسبِّب الوظيفة الانتصابية (الجنسية).

وثمّة جُزَيئات أخرى أكبر قليلاً لها دور هامّ في التطبيقات الحيوية، منها السكّريات البسيطة وجميع جُزَيئات العقاقير. وتعمل العقاقير عموماً بارتباطها إما ببروتين أو بدنا، وتؤدّي إلى تغيُّرات في وظائف تلك البنى. وأحياناً يكون ارتباط هذه الجُزَيئات الصغيرة شديد التخصُّص وعالي الأهمية.

التعرُّف الجُزَيئي

لقد رأينا أنه يمكن أن تكون للجُزَيئات أشكال وشِحنات، وهذا يعني أن أجزاء من الجُزَيء سوف تكون مكوَّنة من ذرّات مختلفة، وسوف تكون فيها كثافات مختلفة للإلكترونات. ونظراً إلى أن قانون كولون ينص على أن الشحنات الموجبة تنجذب إلى الشحنات السالبة، يمكن للجُزَيئات أن تؤثِّر في بعضها البعض بقوى كهربائية (كولونية). على سبيل المثال، يبيِّن الشكل 3 ـ 4 كيفية تجمُّع الذرّات وكيف يمكن لجُزَيئين أن يرتبطا معاً اعتماداً على توزُّع الشِحنة ضمن البُنية الجُزَيئية.

تُسمّى قابلية الجُزَيء لجذب الجُزَيئات الأخرى والارتباط بها غالباً **التعرُّف الجُزَيئي** *molecular recognition*. يمكن للتعرُّف الجُزَيئي أن يكون شديد التخصُّص، وهو الظاهرة الأساسية المسبِّبة للحساسية التي تتعرَّف فيها جُزَيئات كبيرة معيّنة ضمن الجسم على جُزَيئات غريبة، تُسمّى المُحسِّسات allergens، وترتبط بها وتتأثَّر بها. ومن المحسِّسات الشائعة غُبار الطَّلْع والسكر وبعض المكوِّنات الجُزَيئية الطبيعية للشوكولا والفستق السوداني وأشياء أخرى يتحسَّس منها بعض الناس.



الشكل 3 ـ 4: ترابط جُزَيئي بين جُزَيئي ماء.
يشير الرمزان +δ و −δ إلى الشحنتين الموجبة والسالبة

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory*.

يمكن استعمال التعرُّف الجُزَيئي في ظواهر تحسُّسية أخرى. تقوم حاسَّة الشم لدينا، كلياً تقريباً، على تعرُّف جُزَيئات معيّنة بواسطة مُحِسَّات في الفجوات الأنفية، ولذا فإن التعرُّف الجُزَيئي هو وسيلة تمييز رائحة الزهور من رائحة العشب المقصوص حديثاً. وبواسطته تستطيع تمييز الدخان والبقاء بعيداً عن النار. والتعرُّف الجُزَيئي هام جداً في عالَم الأحياء. فالحشرات يجذب بعضها بعضاً بصنع وإطلاق جُزَيئات تُسمّى الفرمونات pheromones. وإذا كنت

معتاداً على استعمال الإنترنت، فقد تكون قد تلقيت عروضاً عديدة لشراء فرمونات (جاذبات جنسية) بشرية. ويمكن أيضاً استعمال التعرُّف الجُزَيئي طريقةً للبناء. فالجُزَيئات الحيوية الكبيرة، ومنها البروتينات، تستطيع تعرُّف بعضها بعضاً، وبذلك تبني خلايا متعضّيات حيوية أعلى. ويمكن للتعرُّف الجُزَيئي أن يجعل سوق نبات الكرفس (البراصيا) صلبة، ويجعل الماء يطفئ ظمأنا، واللواصق تلتصق، والزيت يطفو على سطح الماء.

ويُعتبر التعرُّف الجُزَيئي واحداً من الخصائص المفتاحية للتِقانة النانوية. فنظراً إلى اعتماد كثير من التِقانة النانوية على البناء صعودياً، يُعدُّ صنع الجُزَيئات التي تستطيع تعرُّف نفسها بنفسها أو بواسطة سطح حامل، معدني أو لدِن، طريقةً مفتاحيةً لصنع البنى النانوية. يمكن تشبيه ذلك بمثال من سلَّم المقاسات الكبيرة هو أنه إذا أردت أن تقف مجموعة من الأشخاص في صف عليهم أن يكونوا قادرين على رؤية الصف والمكان الذي سوف يقفون فيه. في السلَّم المكروي، تحصل وظيفة «الرؤية» بواسطة التعرُّف الجُزَيئي.

النقل الكهربائي وقانون أوم

نستعمل عادة جميع حواسّنا لإدراك الأشياء. يُرى الضوء بالعينين، ويُستشعر الضغط بالأذنين واليدين، وتُحسُّ الجُزَيئات بالذوق والشمّ. وتتطلب جميع هذه الحواسّ تأثيرات متبادلة بين أعضاء الحسِّ في أجسامنا والبنى الخارجية التي من قبيل الجُزَيئات والطاقة والأشياء المادّية.

وتتطلب التفاعلات الهامّة للذوق والشمّ والبصر تدفّق الإلكترونات ضمن أجسامنا. وتنتقل الشحنات الكهربائية أيضاً عبر منظوماتنا العصبية لإعلام الدماغ بأن أحد أصابع قدمنا قد جُرح أو أن إحدى يدينا قد تبللت. وتعتمد جميع هذه الإشارات في الواقع على حركة الشِحنة، ومن ثَمَّ، على قانون كولون للشحنات المتماثلة والمختلفة. ومرة أخرى، فإن الكيمياء كلّها (وحتى الظواهر الحيوية) تُختزل إلى إلكترونات. ونحن نعلم أن المعادن تحتوي على إلكترونات حرة تستطيع نقل الشِحنة وبعثرة الضوء. لكن حتى في البنى اللامعدنية التي من قبيل أعصابنا أو أنوفنا تُعتبر التأثيرات الإلكترونية المتبادلة والقوى الكولونية بالغة الأهمية. والإلكترونات المتحركة تزوِّد مجتمعنا بالطاقة، وتُشغِّل تجهيزاتنا، من المصابيح الكهربائية حتى البطاريات والحواسيب.

وعلى غرار قانون كولون الجوهري لوصف القوى العاملة بين الشحنات الكهربائية، ثمة معادلة أيضاً تحدِّد تيار الإلكترونات المتحركة عبر المادة. تُسمّى هذه المعادلة قانون أوم Ohm's law.

إن أكثر تشبيهات تدفُّق الإلكترونات شيوعاً هو التشبيه بتدفّق الماء في النهر. ويُسمّى تدفق الإلكترونات عبر المادة تيارا current، ويُختصر عادة بالرمز I، ويُحدَّد بعدد الإلكترونات المتدفقة في الثانية أو بواحدة أخرى ذات صلة بذلك العدد. وتُختصر المقاومة resistance التي تعيق تدفق التيار (والمشابهة للصخور في النهر) بالرمز R. أما الجهد voltage فهو آخر مكوِّنات قانون أوم وأصعبها تخيُّلاً. ويُعرَّف الجهد بأنه القوة المحرِّكة التي تدفع التيار عبر المادة كما يدفع انحدار مجرى مائي جبلي الماء نحو الأسفل. يُختصر الجهد بالرمز V. ويُعطى قانون أوم بـ:

$$V = IR$$

ينصّ قانون أوم ببساطة على أن الجهد يساوي جداء التيار بالمقاومة، وهو ينطبق على جميع الدارات الكهربائية والإلكترونية التي تتعامل معها في حياتك اليومية. وليس من الصعب أن ترى أن هذا القانون صحيح. فإذا كانت لديك قوة كهربائية محرّكة معيّنة وقمت بزيادتها مع الحفاظ على نفس المقاومة فإن التيار سوف يزداد. وإذا أبقيت القوة المحركة ثابتة وزدت المقاومة فإن التيار سوف يقلّ. وهذا صحيحٌ في جميع الحالات تقريباً. يعمل قانون أوم في مجفِّفات الشعر والحواسيب وخطوط نقل الطاقة. وتعتمد جميع الدارات المتكاملة (الشرائح المكروية) عليه.

لكنْ لا تخضع كل الأشياء لقانون أوم. فالنواقل الفائقة هي موادّ لا توجد فيها مقاومة، ولذا لا ينطبق عليها قانون أوم. وثمة حالات أخرى منها بنى نانوية، كأنابيب الكربون النانوية، لا تخضع أيضاً لقانون أوم. وهذا يقود إلى بعض التطبيقات والتحديات المثيرة التي سوف نعالجها حينما نناقش الإلكترونيات الجُزَيئية.

الميكانيك الكمُّومي والأفكار الكمُّومية

حتى القرن العشرين، بقيت فيزياء الموادّ محكومة بأفكار وقوانين إسحق نيوتن التي كوَّنت، مع إسهامات كثير من العلماء البارزين الآخرين طوال قرنين

بعده، أساس الميكانيك العادي. تصف هذه القوانين بدقة نسبياً جميعَ أنواع الحركة التي تستطيع رؤيتها في سُلَّم المقاسات الكبيرة، ومن أمثلتها حركة السيارة، ومفعول الثقالة، ومسار كرة القدم المقذوفة. لكن عندما يدرس الفيزيائيون البنى الصغيرة جداً في سُلَّم المقاسات النانوية أو في ما دونه تُخفِق بعض القواعد الموجودة في الفيزياء العادية في العمل وفقا للمتوقَّع منها. فالذرّات لا تتصرف تماماً كمنظومات شمسية ضئيلة، وتُبدي الإلكترونات كلاًّ من الخواص الموجية والجُسيْمية. وبسبب هذه الاكتشافات والكثير غيرها استُعيض عن بعض أفكار الميكانيك العادي أو جرى استكمالها بنظرية أحدث تُسمّى الميكانيك الكمّومي quantum mechanics.

ينطوي الميكانيك الكمُّومي على مجموعة من الأفكار الأنيقة المثيرة الاستفزازية. لكنْ في ما يخص أغراضنا هنا، سوف نقتصر على بضع ملاحظات ذات مغزى ضرورية لنا. أولاً، وفي هذا السلَّم الصغير جداً من المقاسات، لا يمكِن إضافة الطاقة والشِحنة باستمرار إلى المادة، بل على شكل أجزاء صغيرة. تُسمّى هذه الأجزاء كمَّات quanta إذا كانت تخصّ الطاقة، وهي وحدات الشِحنة الكهربائية في حالة الشِحنة. فتغيير شِحنة شاردة مثلاً يمكن أن يحصل فقط بإضافة أو إزالة إلكترونات. لذا تكون شِحنة الشاردة مكمَّمة (متزايدة أو متناقصة) بمقدار شِحنة إلكترون واحد. وليس ثمة طريقة لإضافة أو إزالة نصف إلكترون.

لا تقدِّم لنا الحياة اليومية أمثلة كثيرة على السلوك الكمومي. فالتيار الكهربائي يبدو مستمراً، ومقدار الطاقة التي يُمكِن إضافتها إلى كرة قدم بركلة أو إلى كرة بلياردو بنقرة عصا تبدو متغيِّرة تغيُّراً مستمراً: كلما كانت الدفعة أقوى تحركت الكرة بسرعة أكبر. ومع ذلك ثمة بعض الأشياء المكمَّمة في حياتنا اليومية. والنقود من الأمثلة الجيّدة على ذلك، إذ لا يمكنك تجزئة البنس، أما في حالة المبالغ التي هي أكبر من بنس واحد فيمكن دائماً (نظرياً) العثور على نقود أصغر قيمة لإجراء استبدال تامّ.

إن كثيراً من القواعد الأساسية التي تحدِّد سلوك البنى النانوية هي أوجه مختلفة لقوانين الميكانيك الكمومي. ومن الأمثلة على ذلك مسائل من قبيل الحدود الدنيا لمقاس السلك التي يبقى عندها قادراً على نقل الشِحنة الكهربائية، أو مقدار الطاقة الذي يجب وضعه في جُزَيء قبل أن يغيِّر حالة شِحنته أو يسلك سلوك عنصر ذاكرة.

البصريّات

إن الميكانيك الكمومي على درجة بالغة من الأهمية لعدد من مسائل التِقانة النانوية، منها فهم مبادئ البصريات، أي طريقة التأثير المتبادل في ما بين الضوء والمادة. على سبيل المثال، تتحدَّد ألوان الأصبغة المختلفة وفقاً لقواعد الميكانيك الكمومي. فالجُزَيء الكبير، المدعو فثالوسيانين phthalocyanine والذي يعطي اللون الأزرق في بنطال الجينز، يمكن أن يُغيَّر ليعطي لوناً مائلاً إلى الأخضر أو بنفسجياً بتعديل بنيته الكيميائية أو الهندسية. إن هذه التعديلات تغيِّر مقدار كمَّة الضوء التي تؤثِّر في الجزيء وتتأثر به، ولذا تغيِّر لونه المرئي. وعلى نحو مشابه تعطي الألوان الفلوريسانتية المختلفة ظلالاً أكثر اخضراراً أو اصفراراً لأن الجُزَيئات أو البُنى النانوية التي تبطِّن أنبوب مصباح الفلورسانت وتشعّ الضوء تتغيّر. حتى ضوء النجوم يتَّخذ ألواناً مختلفة، لأنه يأتي من نجوم ذات درجة حرارة مختلفة ومن عناصر مختلفة تحترق في الجو النجمي.

ويمكن للضوء أن يؤثِّر أيضاً في المادة ويتأثَّر بها بطرائق أخرى. فإذا لمست سيّارة سوداء في يوم مشمس فإنك تشعر بالطاقة الحرارية التي انتقلت من الشمس إلى المعدن بواسطة الضوء. ويمكن للمادة أيضاً أن تُصدر طاقة ضوئية على غرار ما يحصل في الألعاب النارية ومصابيح الضوء الحرارية. وفي جميع الحالات التي تهمّنا، لا يتغيّر المقدار الكلّي للطاقة المنغمس في العملية (المصطلح التقني لهذه الظاهرة هو انحفاظ الطاقة). لكن بالتحكُّم في هذه الطاقة نستطيع فعل أشياء على درجة كبيرة من الإثارة.

وكلّما أصبحت الأجسام المعدنية أصغر أصبحت كمَّات الطاقة (مقادير أجزاء الطاقة المنفصلة) المقترنة بها أكبر. تشابه هذه العلاقة سلوك الطبول: كلما كان رأس الطبل أضيق كانت طاقة الصوت الصادر عنه وتردده أعلى. وهذا صحيح أيضاً في الأجراس: كلما كان الجرس أصغر كانت نغمة صوته عموماً أعلى. إن هذه العلاقة بين مقاس البُنية وكمَّة الطاقة التي تتأثر بها وتؤثِّر فيها هامة جداً في التحكُّم في الضوء بواسطة الجُزَيئات والبنى النانوية، وتمثِّل موضوعاً كبير المغزى في التِقانة النانوية. وهي أيضاً السبب الكامن وراء تغيير الذهب للونه المذكور في الفصل 2.

4 ـ أدوات العلم النانوي

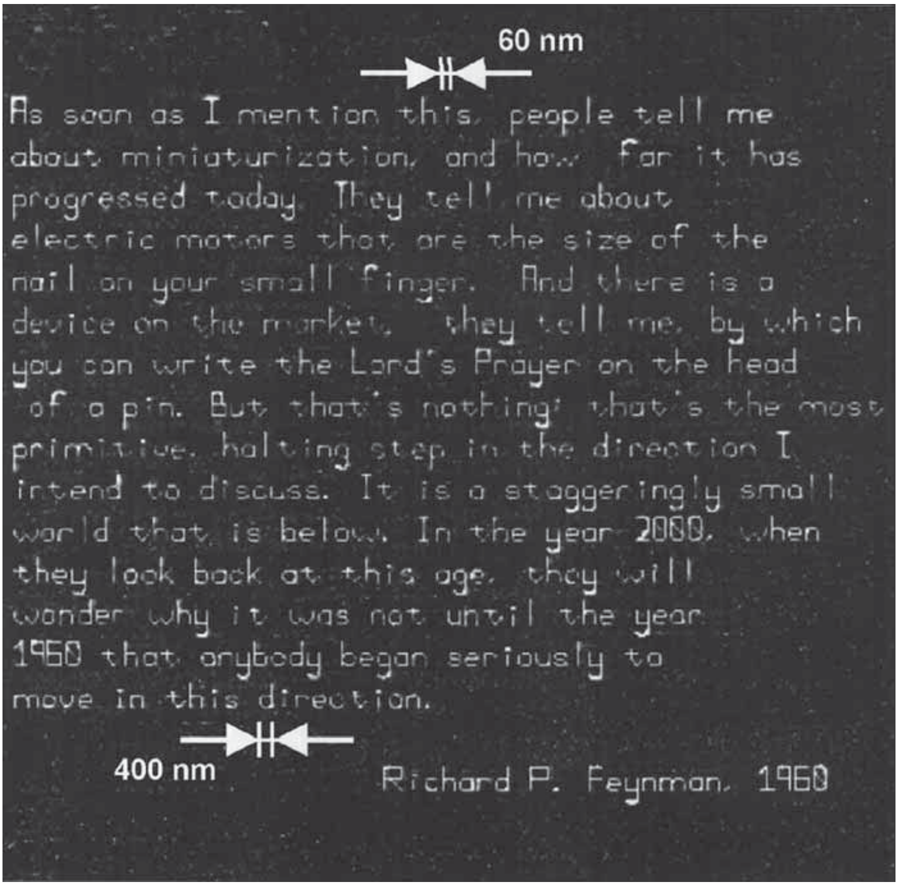
«يحصل التصنيع النانوي في مستويات متناهية الضآلة».

ريتشارد سمولّي Richard Smalley[*]
حائز على جائزة نوبل وأستاذ في جامعة رايس.

■ **أدوات قياس البُنى النانوية** 55

■ **أدوات صُنع البُنى النانوية** 59

(*) حصل على جائزة نوبل في الكيمياء بالاشتراك مع هاري كروتو Harry Kroto وروبرت كُرْل Robert Curl عام 1996 لاكتشافهم الكربون ـ 60.



الشكل 4 ـ 1: الكلمة التي ألقاها ريتشارد فينمان في عام 1960 وأسَّست للتقانة النانوية، وقد كُتِبت في السلَّم النانوي.

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Mirkin Group, Northwestern University*.

«في عام 2000، حينما يتذكّر الناس هذه الحقبة، سوف يستغربون عدم ابتداء أحد حتى عام 1960 بالتحرك في هذا الاتجاه جدياً» (انظر الشكل 4 ـ 1). هذا ما قاله الفيزيائي الحائز على جائزة نوبل ريتشارد فينمان Richard Feynman في الكلمة التي ألقاها في عام 1960 والتي يُعتبر عموماً أنها أطلقت التِقانة النانوية، مع أن فكرته لم تكن تامة النضج حينئذ. لكنْ مع استمرار التصغير بوتيرة عالية وخطرة، استمرت الآلات بالتقلُّص خطوة تلو أخرى في ما نسميّه اليوم التصنيع النانوي النزولي الذي طال أمده. ولم يتصدَّ أحد على الفور لذلك التحدِّي ويبدأ بالتفكير صعودياً حتى عام 2000 (وفقاً لتنبؤ فينمان العجيب الدقة)

حينما بدأت التجهيزات باختراق السلَّم النانوي، وبدأ الناس يتساءلون عن سبب عدم التفكير فيها قبلئذ بوقت طويل.

لكن السبب بسيط، وهو أنه لم تكن لدينا الأدوات. فكل تقنيات التصنيع التي مكَّنتنا من صنع تجهيزات أصغر فأصغر، أي المخارط المكروية وأدوات الحفر وتجهيزات الطباعة بالضوء المرئي، لم تكن قابلة للعمل في السلَّم النانوي. ولم نكن عاجزين عن تداول الذرّات والجُزَيئات المنفصلة فحسب، بل لم نكن أيضاً قادرين حتى على رؤيتها إلى أن اختُرِع المِجْهَر الإلكتروني ومِجْهَر القوّة الذرّية.

أما سبب شهرة التِقانة النانوية الآن فهو أن أدوات رؤية وقياس وتداول المادة في السلَّم النانوي قد أصبحت موجودة. إن تلك الأدوات ما زالت بسيطة، والتقنيات التي نستعملها فيها غير منقّحة، إلا أن ذلك قيد التغيُّر السريع. ويمكن الآن لعالِم في واشنطن، يستخدم مجرد وصلة إنترنت إلى مختبر يُتحكَّم فيه من بُعد في سان هوسيه بكاليفورنيا، أن يحرّك ذرّة واحدة على مِنصّة في المختبر. فالتِقانة مستمرة في التحسُّن، وقد انتقلنا بالقفزة الكمّومية، إن صحَّ التعبير، إلى السلَّم النانوي.

أدوات قياس البُنى النانوية

أجهزة مِجسَّات المسح

إن أولى الأدوات التي ساعدت على انطلاق ثورة العلم النانوي هي ما يُسمّى أجهزة مِجسَّات المسح scanning probe instruments. تقوم هذه الأجهزة كلّها على فكرة طوّرتها مختبرات IBM في زوريخ أولاً في ثمانينيات القرن العشرين. والفكرة بسيطة من حيث المبدأ: إذا ما حككت إصبعك بسطح فإنك تستطيع بسهولة تمييز ما إذا كان مُخملاً أو فولاذاً أو خشباً أو قطْراناً؛ فالموادّ المختلفة تُبدي قوى مختلفة تجاه إصبعك أثناء مسحها للسطوح المختلفة. وفي هذه التجارب تعمل إصبعك وكأنها أداة لقياس القوة؛ فزلقها على صفيحة حريرية أسهل من زلقها على قطران دافئ لأن القطران الدافئ يُبدي قوة تعيق حركة الإصبع أكثر من إعاقة الحرير لها. هذه هي فكرة مِجْهَر القوة الماسح scanning force microscope، وهو أحد أنواع مجاهر مِجسَّات المسح.

ينزلق مِجَسُّ المسح، أو الرأس، على السطح كما تنزلق إصبعك. لكن

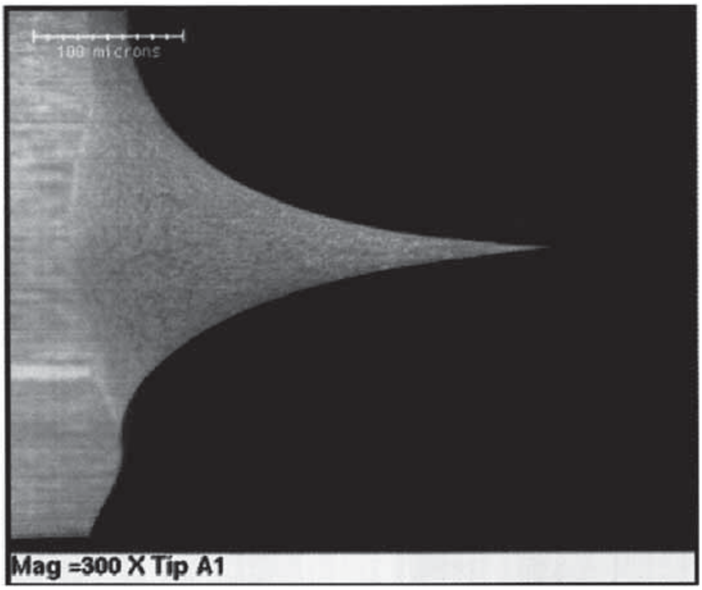
المجس نانوي الأبعاد، ومقاسه يساوي غالباً مقاس ذرّة واحدة في مكان مسح الهدف. وأثناء انزلاق المِجَسّ يمكنه قياس خواصّ مختلفة تبعاً لنوعه. على سبيل المثال، تُستعمل في مِجْهَر القوة الذرّية atomic force microscope AFM، الإلكترونيات لقياس القوة التي تؤثِّر في رأس المجسّ أثناء انتقاله على السطح. وهذا هو تماماً نوع القياس الذي يحصل عند زلق إصبعك على السطح، لكن بعد تقليصه حتى السلَّم النانوي.

وفي مِجْهَر المسح النفقي scanning tunneling microscope STM، تُقاس شدة التيار المارّ من رأس المسح إلى السطح. وبناء على الطريقة التي يجري القياس بها يمكن استعمال المسح النفقي إما لكشف التركيب الهندسي المحلّي (مقدار نتوءات السطح المحلية) أو لقياس خصائص النقل الكهربائي المحلية. وكان المسح النفقي فعلاً أول طرائق مِجَسّات المسح التي جرى تطويرها، وقد حصل غْرِد بنِّغ Gred Binnig وهاينريش رورَر Heinrich Rohrer على جائزة نوبل مناصفة لعام 1986 تقديراً لتطويرهما تلك الطريقة.

وفي مِجْهَر القوة المغنطيسية magnetic force microscope MFM يتكوَّن رأس المسح من مغنطيس، ويُستعمل لتحسُّس البُنية المغنطيسية المحلية على السطح ويعمل الماسح المغنطيسي بطريقة مشابهة لعمل رأس القراءة في سوَّاقة القرص الصلب أو مسجّلات الصوت.

وتُستعمل خوارزمِيّات تحسين حاسوبية للحصول على صورة يستطيع الناس قراءتها من أي جهاز مِجسَّات ماسحة. ومن أمثلة تلك الصور صورة المِعداد النانوي الذي رأيناه في الفصل 1. وثمة حاجة إلى كثير من التحسينات لجعل النتيجة الخام تظهر بجودة صور الأشعة السينية التي تؤخذ لأمتعتك في المطار. ولا تستطيع أجهزة مِجسَّات المسح تصوير الأشياء التي من مقاس الأمتعة، بل هي مفيدة في قياس البنى في سلَّم المقاسات الممتد من مقاس ذرّة واحدة حتى السلَّم المكروي. والتِقانة النانوية سوف توفِّر لنا طرائق أخرى لكشف أمتعة المخالفين.

ثمّة أنواع أخرى من مجاهر المسح المكروي أيضاً، وهي تُسمّى بمجاهر مِجسَّات المسح لأنها تقوم على الفكرة العامة للمسح النفقي. فالفكرة الهامة فيها جميعاً هي أن رأساً ماسحاً نانوي المقاس يُستعمل لتصوير البنى النانوية باستعمال قوى أو تيارات أو كبح مغنطيسي أو تمييز كيميائي أو أي خواصّ أخرى.



الشكل 4 ـ 2: رأس مِجْهَر مَسْح نفقيّ مصنوع من التنغستين

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Hersam Group, Northwestern University*.

يُبَيِّن الشكل 4 ـ 2 مثالاً لواحد من رؤوس المسح تلك. وقد مكَّنت مجاهر المِجسَّات الماسحة من رؤية أشياء ذات أبعاد ذرّية أول مرّة، وكانت ذات أهمية كبيرة لقياس وفهم البنى النانوية المقاس.

المِطْيافِيّة

تعني **المِطْيافِيّة** *spectroscopy* تسليط ضوء ذي لون مُعيَّن على عيّنة وملاحظة امتصاصه وتبعثره، إضافة إلى خواصّ المادّة المدروسة الأخرى. والمِطْيافِيّة هي تقنية أقدم كثيراً وأعمُّ من تقنية مجاهر مِجسَّات المسح، وهي توفِّر كثيراً من التوصيفات الإضافية.

بعض أنواع المِطْيافِيّة مألوف في الحياة اليومية. فآلات الأشعّة السينية مثلاً تمرِّر إشعاعاً عالي الطاقة عبر الجسم الذي يجري فحصه، وتسجِّل كيفية تبعثره بواسطة النوى الثقيلة لأشياء من قبيل الفولاذ والعظام. وتُنتِج الأشعة السينية التي تعبر الجسم صورةً رأى مثلها الكثيرون منا في عيادة الطبيب بعد زلَّة على الجليد أو في حوض الحمّام. والتصوير بالمِرنان المغنطيسي magnetic resonance imaging هو نوع آخر من المِطْيافِيّة المألوفة لنا في التطبيقات الطبية.

يُستعمل كثير من أنواع المِطْيافِيّة ذات طاقات الضوء المختلفة في تحليل البنى النانوية. أما الصعوبة الشائعة فيها فهي أن لكل ضوء طولَ موجةٍ مميِّزاً، وهذا ما يجعله غير مفيد كثيراً في دراسة البنى التي هي أصغر من ذلك الطول. ونظراً إلى أن طول موجة الضوء المرئي يقع بين 400 و900 نانومتر تقريباً فإنه لن يكون مفيداً في رؤية الأشياء التي لا تزيد مقاساتها على بضعة نانومترات. إن المِطْيافِيّة عظيمة الأهمية لتوصيف البنى النانوية الإجمالية، إلا أن معظم أنواعها لا يُعطينا معلومات عن البنى في سُلَّم النانومتر.

الكهركيمياء

تتعامل الكهركيمياء electrochemistry مع كيفية تغيير السيرورات الكيميائية بتطبيق تيارات كهربائية، وبكيفية توليد التيارات الكهربائية من التفاعلات الكيميائية. وأكثر التجهيزات الكهركيميائية شيوعاً هي البطّاريات التي تُنتِج طاقة كهربائية من تفاعلات كيميائية. أما السيرورة المعاكسة فتظهر في الطِلاء الكهربائي electroplating حيث تترسَّب المعادن على سطح المادة التي تُطلى، لأن شوارد المعدن الموجبة الشِحنة تمتصّ الإلكترونات من التيار المارّ عبر السطح وتتحوّل إلى معادن محايدة.

تُستعمل الكهركيمياء على نطاق واسع في صنع البنى النانوية، ويمكن استعمالها أيضاً في تحليلها. ويمكن قياس طبيعة ذرّات سطح صفيفة مباشرة باستعمال الكهركيمياء، وتُستعمل تقنيات كهركيميائية متقدمة (ومنها تقنيات مِجسَّات مسح كهركيميائية) غالباً لبناء البنى النانوية ودراستها.

المِجْهَر الإلكتروني

كانت الطرائق التي تمكِّن من رؤية البنى النانوية إفرادياً متوفّرة حتى قبل تطوير تقنيات مِجسَّات المسح. وتقوم تلك الطرائق على استخدام الإلكترونات بدلاً من الضوء لمعاينة بُنية المادة وسلوكها. وهي أنواع مختلفة من التضخيم الإلكتروني، إلا أنها جميعاً تقوم على الفكرة العامة نفسها. تُسرَّع الإلكترونات وتمرّر عبر العيّنة. وتتبعثر تلك الإلكترونات عندما تتلاقى مع نوى ذرّات العيّنة وإلكتروناتها. وبتجميع الإلكترونات التي لم تتبعثر يمكننا بناء صورة تُري أمكنة الجُسيمات التي بعثرت الإلكترونات التي لم تعبّر العيّنة. يبيِّن الشكل 4 ـ 2 ما يُسمّى بصورة مِجْهَر النفاذ الإلكتروني transmission electron microscope

(TEM). ضمن الظروف الجيدة، يمكن لصور مِجْهَر النفاذ الإلكتروني أن تحقّق ميّزاً resolution كافياً لرؤية الذرّات إفرادياً، إلا أنه غالباً ما يجب طِلاء العيّنات أولاً قبل تصويرها. يُضاف إلى ذلك أن مِجْهَر النفاذ الإلكتروني لا يستطيع تصوير سوى البُنية المادية، لا القوى التي من قبيل قوى الحقلين الكهربائي والمغنطيسي. ومع ذلك ثمة كثير من الاستعمالات للمِجْهَر الإلكتروني، وهو مستعمل على نطاق واسع في تحليل البنى النانوية وتفسيرها.

أدوات صُنع البُنى النانوية

أجهزة مِجسّات المسح مرّة أخرى

يمكن استعمال أجهزة مِجسّات المسح لرؤية البنى ولتداولها أيضاً. والتشبيه بمسح السطح باليد مفيد هنا أيضاً. فعلى غرار الخدش والتجويف والقصّ التي يمكنك إحداثها في سطح طريّ عندما تزلق إصبعك عليه، يمكنك أيضاً تعديل السطح بواسطة رأس مِجَسٍّ ماسح.

استُعملت مِجسّات المسح لتداول بُقع الجُزَيئات إفرادياً في المعداد المبيّن في الشكل 1 ـ 3. واستُعملت أيضاً لتكوين أشكال نانوية رائعة بترتيب الذرّات أو الجُزَيئات على سطوح ذات بُنى معيّنة. واستُعملت تلك البُنى لاستعراض واختبار بعض المفاهيم العلمية الجوهرية في الكيمياء البنيوية والتأثيرات الكهربائية والسلوك المغنطيسي وغيرها. إن هذا التجميع للموادّ على أساس ذرّات أو جُزَيئات فرادى يحقّق حُلماً طالما حلم به الكيميائيون.

يمكن بوجه عامّ نقل الأشياء الصغيرة (التي يمكن أن تكون ذرّات أو جُزَيئات منفصلة) على سطح إما بدفعها عليه أو برفعها عنه بواسطة رأس ماسح متحرك، ثم إعادة وضعها على ذلك السطح. وفي كلتا الحالتين يعمل الرأس الماسح كحفّارة نانوية المقاس ترفع التراب وتضعه جانباً. والحفّارة في تطبيقات الدفع هي مجرّد جرّافة. أما في تطبيقات الرفع، فتعمل الحفّارة كالرافعة ذات المِجْرَفة.

يتّصف التجميع السطحي بواسطة المِجسّات الماسحة بالجودة العالية المتأصّلة فيه، إلا أنه يعاني من عيبين هما أنه غالٍ وبطيء نسبياً. وهو موضوع جيد للبحث، فلكي تصبح التِقانة النانوية قوة حقيقية علينا أن نكون قادرين على صُنع البُنى النانوية بتكاليف منخفضة (تذكّر ملاحظاتنا بخصوص قانون مور وحقيقة أن طرائق التجميع القائمة على السليكون جعلت الترانزستورات أصغر

وأرخص وأكثر وثوقية أيضاً). وبرغم تحقيق تقدُّم كبير في بناء آلات تُشغِّل مئات، بل آلاف، رؤوس المِجسَّات في الوقت نفسه، فإن صنع البنى النانوية باستعمال طرائق المِجسَّات الماسحة ما زال كصنع السيارات يدوياً أو كنفخ مصابيح الضوء الزجاجية إفرادياً. يمكن الحصول بتلك الطرائق على نتائج فنية رائعة، إلا أنه لا يمكن استعمالها لتلبية الطلب الواسع.

الطباعة في السلَّم النانوي

تعني عبارة «الطباعة الحجرية lithography» في الأصل صُنع الأشياء من الحجر. والصورة الحجرية هي صورة (ورقية عادة) تُحفر على حجر، ثم يُحبَّر الحجر ويُكبس على الورق.

يعمل كثير من أنواع الطباعة في المستويات الصغيرة بطريقة مشابهة. وفي الواقع، تعتمد الطرائق الشائعة الاستعمال في صنع الشرائح الحاسوبية الحالية على الطباعة بالأشعّة السينية التي يُصنع فيها قناع رئيسي بطرائق كيميائية، ثم تُمرَّر الأشعة السينية عبر القناع لتكوين بُنية الشريحة الفعلية. وهذه الطريقة مشابهة للطباعة بالشاشة الحريرية على القمصان الصيفية.

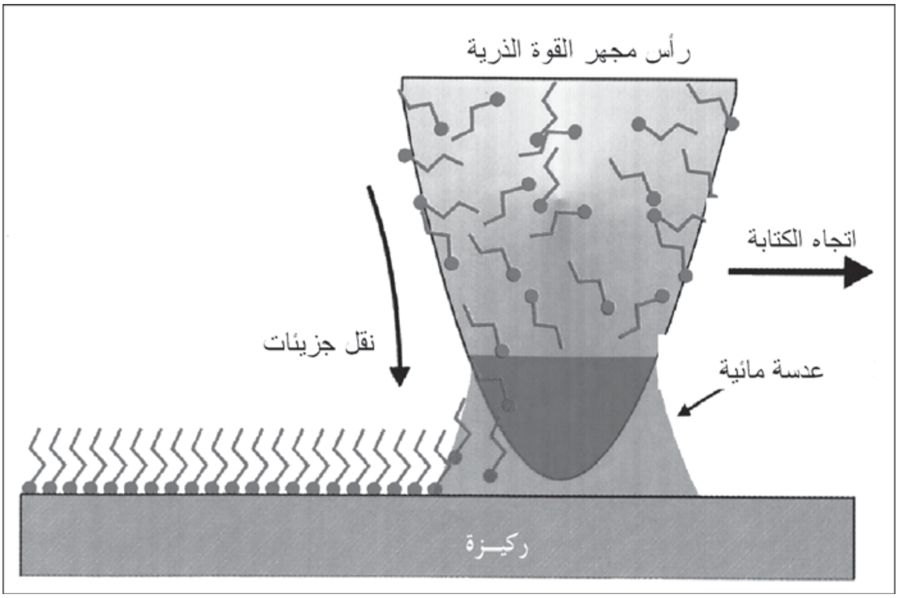
لا يمكن استعمال الضوء المرئي في الطباعة الضوئية في السلَّم النانوي لأن طول موجة هذا الضوء لا تقلّ عن 400 نانومتر، ولذا من الصعب صُنع بُنى أصغر من ذلك باستخدامه مباشرة. وهذا واحد من أسباب أن استمرار قانون مور في السلَّم النانوي يتطلب طرائق تحضير جديدة كلياً.

ومع ذلك، ثمة عدة تقنيات لإجراء الطباعة الضوئية عند المقاسات الصغيرة. وإحدى أكثر تلك الطرائق بساطة وجودة هي الطباعة بالسكّ المكروي microimprint lithography، التي طوَّرها أولاً جورج وايتسايدس George Whitesides وفريق عمله في جامعة هارفارد. تعمل هذه الطريقة كعمل الختم المطّاطي الذي ما زال مستعملاً في مكاتب البريد. يُحفر الشكل على سطح مطاطي (وهو في هذه الحالة بوليمر شبه مطاطي يُصنع من السليكون والأكسجين)، ثم يُغطّى السطح المطاطي بحبر جُزَيئي. ثم يُدمغ الحبر على السطح المتمثِّل بالأوراق في مكاتب البريد، أو بمعدن أو بوليمر أو أكسيد أو أي سطح آخر في الأختام الصغيرة المقاس. إن السكّ في المستويات الصغيرة أشدّ تعقيداً، لكنه رخيص جداً ويمكن استعماله لصنع الكثير من النسخ. في

البداية، عملت الأختام في السلَّم المكروي (1000 نانومتر)، لكن التحسينات الأخيرة أوصلتها إلى السلَّم النانوي.

الطباعة النانوية بالقلم الغاطس

إن الطريقة الوحيدة لبناء بُنى اعتباطية على السطوح هي كتابتها بنفس الطريقة التي نكتب بها خطوط الحبر باستعمال قلم الحِبر. ولتكوين هذه الخطوط في السلَّم النانوي من الضروري أن يكون ثمة قلم حبر نانوي. ومن حُسن الطالع أن رؤوس مِجْهَر القوة الذرّية تمثِّل أقلاماً نانوية مثالية. وقد أخذت الطباعة النانوية بالقلم الغاطس dip pen nanolithography اسمها من القلم الذي يُغطَّس في الحبر والذي كان يُستعمل في القرن التاسع عشر في المدارس. ويوضح الشكل 4 ـ 3 مبدأ الطباعة بالقلم الغاطس، والجزء المقتطف من كلمة فينمان المبيّن في الشكل 4 ـ 1 هو واحد من البنى النانوية المصنوعة بالطباعة بهذه الطريقة. في هذا النوع من الطباعة يوجد خزّان «حبر» (ذرّات أو جُزَيئات حِبر) في أعلى رأس مِجَسّ المسح الذي يُحرَّك فوق السطح تاركاً خطوطاً وأشكالاً عليه.



الشكل 4 ـ 3: رسم توضيحي لآليّة الطباعة بالقلم الغاطس. الخطوط المكسَّرة هي «حِبر» جُزَيئي

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Mirkin Group, Northwestern University*.

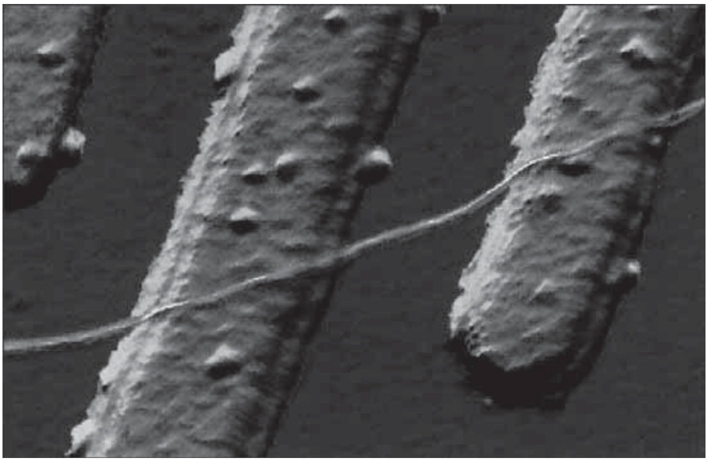
تتصف الطباعة النانوية بواسطة القلم الغاطس، التي طوَّرها تشاد ميركين Chad Mirkin وزملاؤه في جامعة نورثوِسترن، بمزايا عديدة أهم اثنتين منها هما أن أي شيء تقريباً يمكن أن يُستعمل حبراً نانوياً، وأنه تمكِن الكتابة على أي سطح تقريباً. كذلك تستطيع استعمال الطباعة النانوية بالقلم الغاطس لصنع أيّ بُنية تقريباً بقطع النظر عن تفاصيلها وتعقيدها لأن رؤوس مِجْهَر القوة الذرّية سهلة التداول. وهذا ما يجعل الطباعة النانوية بالقلم الغاطس أفضل تقنية لتكوين بنى جديدة معقدة بكمّيات صغيرة. أما عيب الطريقة فهو أنها بطيئة، وذلك خلافاً للختم النانوي. إنها كالرسم اليدوي مقارنة بالطباعة في أيامها الأولى. إلا أن ثمة جهداً يُبذل لتحسينها، وبخاصةً لدى الشركة الناشئة NanoInk.

الطباعة بالحُزمة الإلكترونية

ذكرنا أن الطباعة الصناعية الحالية القائمة على الضوء محدودة من حيث مقدرتها على تكوين أشكال تقلّ مقاساتها عن طول موجة الضوء المستخدم. ومع ذلك يمكننا من حيث المبدأ الالتفاف على هذا القيد باستخدام ضوء ذي طول موجة قصير، إلا أن هذا الحل يقود إلى مشاكل أخرى غير مرغوب فيها. فالضوء القصير الموجة يمتلك طاقة كبيرة، ولذا يمكن أن يؤدّي إلى مفاعيل جانبية سيّئة من قبيل اقتلاع الأشكال التي تقوم بتكوينها من السطح (تخيَّل أنك تسقي نباتات حديقتك بخرطوم إطفاء).

ثمّة طريقة أخرى لتجاوز المشكلة هي استعمال الإلكترونات بدلاً من الضوء، أي استعمال الطباعة بالحُزْمَة الإلكترونية E-beam lithography لصُنع البُنى النانوية الأبعاد. ويبيّن الشكل 4 ـ 4 قُطبين صُنِعا بالطباعة بالحزمة الإلكترونية، حيث جرى صفّ أسلاك نانوية من البلاتين. والبُنية الممتدة فوق القطبين النانويين هي جُزَيء منفصل على شكل أنبوب كربون.

وثمة تطبيقات للطباعة بالحزمة الإلكترونية أيضاً في صناعة الإلكترونيات المكروية الحالية، وهي تُعتبر أحد السُّبل التي سوف تُتبع للإبقاء على قانون مور فاعلاً إلى أن تفرض الخواصّ التي تعتمد على المقاس نفسها نهائياً.



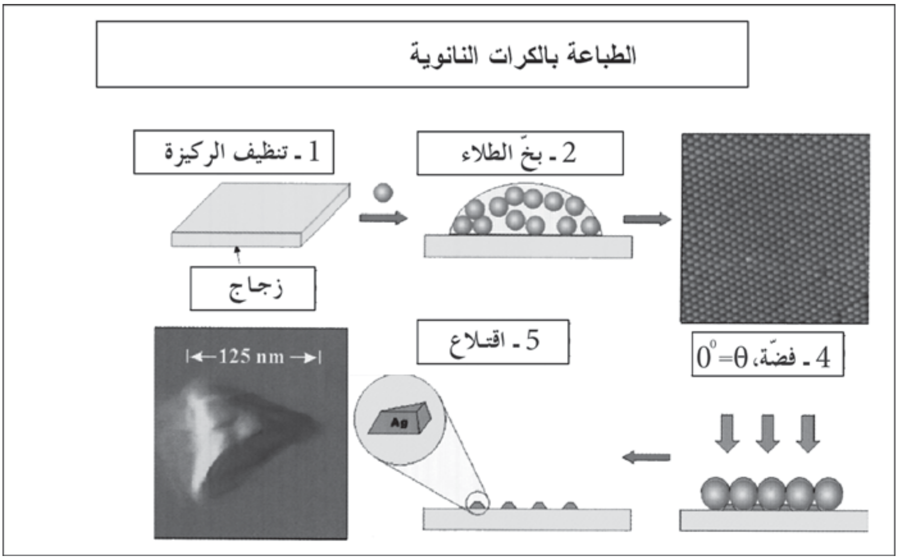
الشكل 4 ـ 4: قُطبان صُنِعا بالطباعة بالحُزمة الإلكترونية
الخيط الأفقي الرفيع هو أنبوب كربون نانوي

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Dekker Group, Delft Institute of Technology*.

الطباعة باقتلاع الكُرات النانوية

إذا وُضعت كُرات اللعب الزجاجية الصغيرة معاً على لوح مرصوصةً بإحكام كوَّنت مجموعة متراصّة تُحاط فيها كل كُرة بستّ كُرات أخرى. وإذا طُليَت هذه الصفيفة من الكُرات بالبخّ من أعلى، ثم نُزعت عن اللوح، ظهر الطلاء على شكل مجموعة من نقاط طلاء لكل منها شكل مثلّثي مع جوانب مُحَدَّبة نحو الداخل (انظر الشكل 4 ـ 5). وإذا كانت الكُرات نانوية المقاس كانت نقاط الطلاء نانوية المقاس أيضاً.

ويُري الشكل 4 ـ 5 نقاطاً من معدن الفضّة حضَّرته مجموعة ريك فان دوين Rick Van Duyne في جامعة نورثوِسترن. تُسمّى هذه التقنية الطباعة باقتلاع الكُرات النانوية nanosphere lift off lithography. وهي تتّصف بعدّة سِمات جيّدة: يمكن استعمال أنواع كثيرة من الألواح (السطوح) والطلاءات (معادن، جُزَيئات)، ويمكن توضيع عدة طبقات من الطلاء (الجُزَيئات) تسلسُلياً على المثلثات. والشيء الهامّ هو أن هذه الطباعة باقتلاع الكُرات يمكن أن تحصل بالتوازي مثل الختم وخلافاً للطباعة بالقلم الغاطس أو بمِجسّات المسح. ويمكن وضع كثير من الكُرات النانوية على السطح، وهذا يمكِّن من تحضير صفيفات منتظمة من كثير (آلاف أو أكثر) من النقاط.



الشكل 4 ـ 5: رسم توضيحي للطباعة باقتلاع الكُرات النانوية

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Van Duyne Group, Northwestern University* .

التركيب الجُزَيئي

يُعتبر إنتاج جُزَيئات ذات بُنى جُزَيئية معيّنة واحداً من أنشط وأمتع فروع الكيمياء. ويتضمّن التركيب الجُزَيئي صُنع جُزَيئات معيّنة لأغراض محدّدة، إما لهدف علمي بحت، أو لغايات تطبيقية خاصة جداً. وثمة الكثير من أعمال التركيب الجُزَيئي لدى شركات العقاقير، وكثير من العقاقير الحديثة، ومنها البنيسلّين والليبتور Lipitor والتاكسول Taxol والفياغرا Viagra، وهي منتجات تركيب جُزَيئي معقّد.

يعني تكوين بُنى نانوية ذات أشكال هندسية معيّنة، في مواضع محدّدة على سطح ما، أن أخْذَ جُزَيء يحقّق خطوة واحدة إلى الأمام. وإلى جانب اهتمام التركيب الجُزَيئي بخواص الجزيء الكيميائية وتركيبه يجب أن يهتم أيضاً بتوضُّع البنى النانوية المادي وببنائها. على سبيل المثال، تتضمّن بعض تقنيات التزويد بالدواء التي سوف نراها لاحقاً أخذ عناصر نشِطة من الدواء ودفعها ضمن قواقع نانوية المقاس لجعلها تعبر مناطق من الجسم لم تستطع اختراقها من قبل. ولفعل ذلك يجب حقن الدواء في القوقعة الجُزَيئية كما يُحقن الهُلام في قالب الكعكة. لا توجد هنا سوى تأثيرات متبادلة فيزيائية، وليس ثمة من روابط كيميائية بين الاثنتين.

من الواضح أن أي تقنية للتعامل مع الذرّات واحدة تلو أخرى هي تقنية بطيئة جداً ومُربكة، ولا سيّما إذا أردنا صنع موادّ جَسِيمة أو حتى ما يكفي من الدواء المغلَّف لمعالجة شخص.

التجميع الذاتي

ثمّة مشكلة في معظم تقنيات تجميع البنى النانوية التي رأيناها حتى الآن هي أنها تتطلب جهداً كبيراً. وفي كل حالة، نحاول فرض إرادتنا على تلك الأجسام الصغيرة وتداولها ومعالجتها لتصبح كما نريدها تماماً. لكنْ ألن يكون من الجيد لو استطعنا خلط الموادّ الكيميائية معاً فقط، وترك الجُزَيئات ترتّب نفسها بنفسها لتكوين بُنى نانوية؟

إنّ التجميع الذاتي self-assembly هو إحدى طرائق التصنيع النانوي التي تفعل ذلك. وفكرة التجميع الذاتي هي أن الجُزَيئات تسعى دائماً إلى أخفض مستوى طاقة متاح لها. فإذا كان الارتباط بجُزَيء مجاور يحقّق ذلك، فإن الجُزَيئين سوف يترابطان. وإذا كان تغيير اتجاه موضعيهما يحقّق ذلك فإنهما سوف يغيّران اتجاهيهما. إن هذه الفكرة، بأبسط تجلّياتها، هي نفس فكرة القوة التي تجعل صخرة تتدحرج إلى أسفل التل. فمهما فعلت بالصخرة من رفع أو رمي أو فتل أو تحطيم فإنها تحاول دائماً الهبوط إلى أسفل التل. بإمكانك إيقافها عن الهبوط، إلا أن ذلك يتطلب منك تدخُّلاً فعالاً. والكرة هنا تسعى إلى تقليص طاقتها الكامنة إلى أدنى حد ممكن. وفي حالة الجزيء فإنه يحاول تقليص أنواع أخرى من الطاقة. ووفقاً لقانون كولون فإن معظم القوى الفاعلة هنا تنجم عن التأثيرات المتبادلة بين الشحنات.

وأحد سُبل تخيُّل التجميع الذاتي هو تخيُّل البوصلة إذا هززت البوصلة، اضطربت إبرتها وتوجّهت في جميع الاتجاهات تقريباً مدة من الوقت، وعندما تتوقف عن هزِّها تعود لتتجه من الجنوب إلى الشمال. ثمة مغنطيس صغير في إبرة البوصلة، وتوجُّهه من الجنوب إلى الشمال يجعل طاقته بالنسبة إلى حقل الأرض المغنطيسي أصغرية. وأنت لا تحتاج إلى بذل أي عمل لجعل الإبرة تفعل ذلك، فهي تفعله طبيعياً. وتقنيات التجميع الذاتي تقوم على فكرة جعل المكوِّنات ترتّب أنفسها طبيعياً، على غرار إبرة البوصلة، وفقاً للطريقة التي نريدها.

تُعتبر القوى المنغمسة في التجميع الذاتي ضعيفة عموماً مقارنة بالقوى

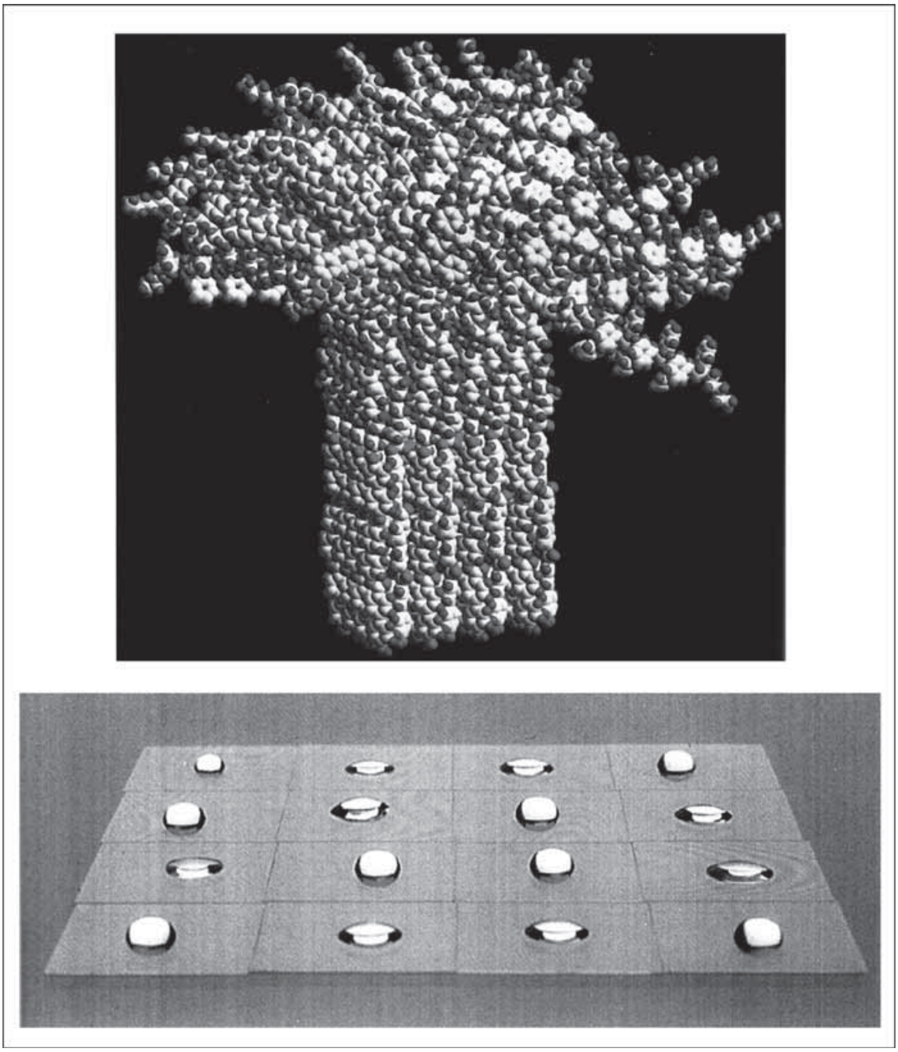
الرابطة التي تجمع الجُزَيئات معاً. فهي تمثِّل الجوانب الضعيفة من التأثيرات الكولونية وتوجد في كثير من الأماكن في الطبيعة. على سبيل المثال، تجمع التأثيرات الضعيفة، المسمّاة بالروابط الهدروجينية، ذرّة الهدروجين في جُزَيء الماء السائل مع ذرّة أكسجين من الجزيء المجاور، وتمنع الجُزَيئات من أن تتحوّل إلى بخار ماء عند درجة حرارة الغرفة. وتساعد الروابط الهدروجينية أيضاً على بناء البروتينات على شكل بُنى ثلاثية الأبعاد ضرورية لوظائفها الحيوية.

وثمة تأثيرات متبادلة ضعيفة أخرى، منها مفاعيل النفور من الماء التي تجعل الزيت يطفو على سطحه، والتفاعلات متعددة القُطبية. تحصل التفاعلات متعددة القطبية بين بُنى غير مشحونة (لا توجد فيها شِحنة صافية، أي إنها ليست كالإلكترون الذي يتأثر بإلكترون آخر ويؤثر فيه بقوة كولونية شديدة). أما ما يحصل هنا فهو توزُّع مختلف للشِحنة على الجُزَيئين اللذين يؤثر كل منهما في الآخر. وهذه التفاعلات متعددة القطبية ضعيفة عموماً، لكنها قوية بقدر يكفي لتكوين بُنى شديدة التعقيد.

في التجميع الذاتي، يضع البنَّاء النانوي ذرّات أو جُزَيئات معيّنة على السطح أو على بُنية نانوية مبُنية من قبل. ثم ترتِّب الجُزَيئات نفسها في وضعية محدّدة، مكوِّنة أحياناً روابط ضعيفة وأحياناً روابط تشاركية قوية، بُغية جعل الطاقة الكليّة أصغرية. وإحدى المزايا العظيمة لهذا النوع من التجميع هي أن البُنى الكبيرة يمكن أن تُحضَّر بهذه الطريقة، ولذا ليس من الضروري تكوين بنى نانوية معيّنة إفرادياً (كما في بناء البنى النانوية بمِجْهَر القوة الذرّية أو المسح النفقي أو القلم الغاطس). إن التجميع الذاتي سوف يكون الطريقة المفضّلة على الأرجح لصنع صفيفات بُنى نانوية كبيرة من قبيل ذاكرة الحاسوب وداراته المنطقية التي يجب أن تُحضَّر إذا كانت صلاحية قانون مور ستستمر إلى ما بعد العقد القادم.

ولا يقتصر التجميع الذاتي على تطبيقات الإلكترونيات. فالبنى الذاتية التجميع يمكن أن تُستعمل لأشياء عادية من قبيل حماية سطح من الاهتراء أو جعل سطح ما زلقاً أو لاصقاً أو مبلولاً أو جافاً. ويُري الشكل 4 ـ 6 بعض الأمثلة العظيمة على التجميع الذاتي من مخابر Sam Stupp لدى جامعة نورثوِسترن. في هذه الحالة، استُعمل مستويان من التجميع الذاتي. في الأول، يُنتِج التجميع الذاتي لجُزَيئات طويلة معقدة، تُسمّى اللوالب القضبانية، البُنية النانوية الشبيهة بالفُطر. ثم تتجمّع البنى النانوية تلك ذاتياً لتكوين طِلاء سطح يجعل الزجاج ينزلق مؤتلفاً الماء (أليفاً للماء) أو نفوراً منه (يكره الماء جاعلاً

إياه يتجمّع في قطرات). وهذا يُري أيضاً أنه يمكن تكوين بُنى شديدة التعقيد باستعمال التجميع الذاتي وذلك بتجزئة المهامّ إلى خطوات.



الشكل 4 ـ 6: نموذج جُزَيئي (في الأعلى) لـ «فُطر» ذاتي التجميع (أي بوليمر اللولب القضباني). تُري الصورة في الأسفل التحكُّم في تبليل السطح بطبقة من هذه الفطور

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Stupp Group, Northwestern University*.

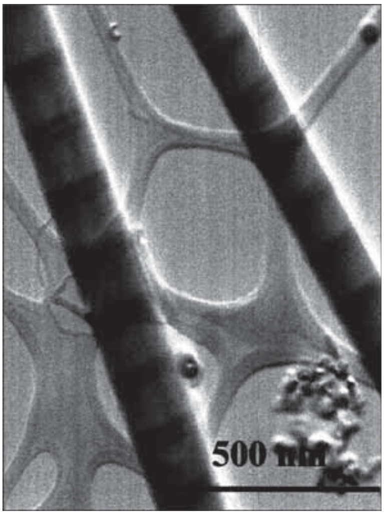
ربما كان التجميع الذاتي أهمّ تقنيات التصنيع في السلَّم النانوي بسبب عموميته، وقابليته لتكوين بُنى في سلالم المقاسات المختلفة، وانخفاض تكلفته.

تنمية البلّورات في السلَّم النانوي

إن تنمية البلّورات هي نوع آخر من التجميع الذاتي. تُسمّى بلّورات الملح المكوَّن من شوارد بالبلّورات الشاردية، وتسمّى تلك المكوَّنة من ذرّات بالبلّورات الذرّية، والمكوَّنة من جُزَيئات بالبلّورات الجُزَيئية. لذا يكون مِلح الطعام (كلور الصوديوم) بلّورة شاردية، ويكون السكّر (السكروز $C_{12}H_{22}O_{11}$) بلّورة جُزَيئية.

تُعتبر تنمية البلّورات فناً من ناحية، وعلماً من ناحية أخرى. ويُمكِن تنمية البلّورات من محلول باستعمال بذرّة بلّورية، ويتحقَّق ذلك، مثلاً، بوضع بلّورة صغيرة في محلول يحتوي على الموادّ المكوِّنة لها، وتُترك تلك المكوِّنات لتحاكي أنماط البلّورة الصغيرة، أو البذرّة. إن قوالب السليكون silicon boules المستعملة في صنع الشرائح المكروية تُصنع أو «تُسحب» بهذه الطريقة.

باختيار بذور البلّورات وظروف التنمية اختياراً ملائماً يصبح من الممكن جعل البلّورات تأخذ أشكالاً غير مألوفة. فقد استعمل تشارلز ليبر Charles Lieber ومجموعته في جامعة هارفارد بلّورات نانوية المقاس لتكون بذوراً لأنابيب كربون نانوية مكوَّنة من بلّورات أُحادية طويلة تشابه السلك، ولمركَّبات من قبيل فوسفيد الإنديوم وزرنيخ الغاليوم، ولبلّورات ذرّية كالسليكون. تتّصف تلك الأسلاك النانوية (أحدها مُبيّن في الشكل 4 ـ 7) بخواصّ نقل كهربائي جيدة، ولها استعمالات كثيرة في كل من البصريات والإلكترونيات.



الشكل 4 ـ 7: سلكان نانويان متوازيان. اللون الفاتح هو سليكون، والغامق هو سليكون/جرمانيوم

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Yang Group, University of California at Berkeley*.

البَلْمَرة

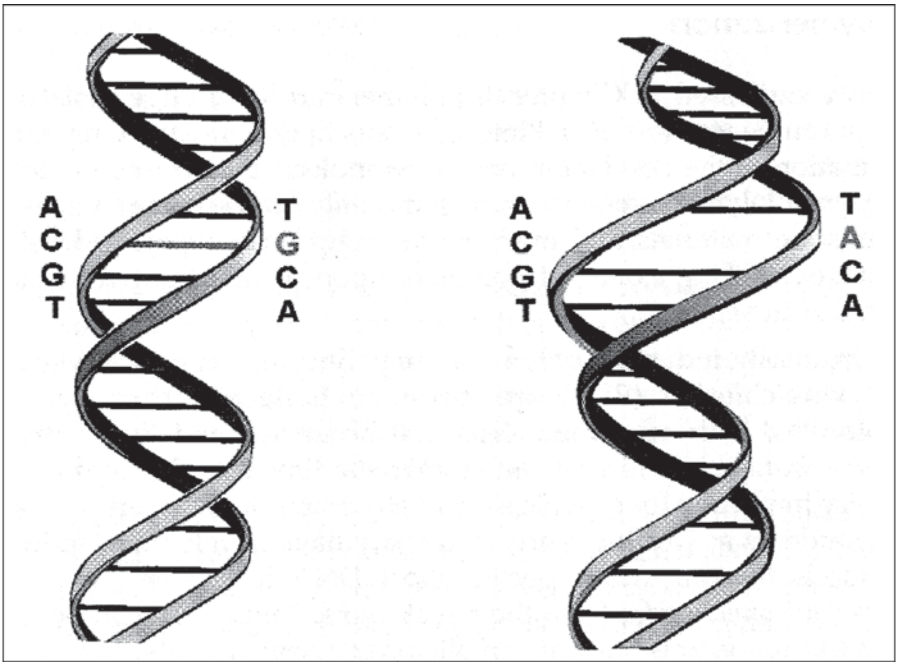
وفقاً لما ناقشناه في الفصل الثالث، تُعتبر البوليمرات جُزَيئات كبيرة جداً ويمكن أن يتألف الواحد منها من ملايين الذرّات، وأن تتكوَّن بتشكيلات متكررة من الروابط بين الوحدات الجُزَيئية الصغيرة (المونومرات). والبَلْمَرة هي تقنية واسعة الاستعمال لصنع موادّ نانوية المقاس، وحتى موادّ أكبر كثيراً: تعمل لواصق الإبوكسي بتكوين بوليمرات مضخَّمة من خلال مزج مكوِّنين من الإبوكسي.

إنّ البوليمرات الصناعية، ومنها البولي ستيرين والبولي إثيلين والكلور المتعدد الفينيل، تُصنع عادةً ببناء جُزَيئات طويلة جداً بخطوات تسلسلية كثيرة. والبَلْمَرة المتحكَّم فيها، التي يُضاف فيها مونومر إلى آخر تسلسلياً، على درجة كبيرة من الأهمية لبناء بُنى جميلة معيّنة. وقد طوَّر روبرت لِتْسينغرRobert Letsinger وطلابه في جامعة نورثوِسترن سلسلة من طرائق تحضير مقاطع دنا قصيرة معيّنة تُسمّى أوليغونيكليوتيدات oligonucleotides. تعني الكلمة الإغريقية oligo «قِلَّة» (يمثِّل المونومر وحدة واحدة، والأوليغومر عدة وحدات، والبوليمر كثيراً من الوحدات). وتُستعمل في ما يُسمّى بالآلات الجينية تفاعلات كيميائية بسيطة ذكية لبناء سلاسل دنا معيّنة.

يُعدُّ بناء سلاسل الدنا على درجة عالية من الأهمية لعدة أسباب. ففي التِقانة الحيوية الحديثة تُستعمل هذه السلاسل لتكوين بُنى حيوية جديدة (عقاقير، موادّ، بروتينات) اعتماداً على قابلية الجراثيم على التكاثر. يوضع قالب دنا تركيبي ضمن الدنا الجرثومي، فتُنتِج الجراثيم حينئذ نسخاً كثيرة من ذلك البروتين المطلوب. ويحصل تعديل دنا الجرثوم باستعمال سلسلة من التفاعلات الكيميائية، وتُستعمل الآلات الجينية لتحضير الأوليغونوكليتيدات القصيرة المطلوبة لتعديل الدنا الجرثومي مستعملة تلك السيرورة لإنتاج البروتين المطلوب. وهذا يمكّن عملياً من إنشاء معامل بروتينات لأي بروتين ترغب فيه. وأحد الأمثلة الجيدة لكيفية استعمال هذه الطريقة هو صُنع الإنسولين البروتيني لمعالجة مرضى السكّر.

وتُستعمل سلاسل دنا قصيرة معيّنة مع التجميع الذاتي بكثافة لصنع موادّ يرتبط فيها شريط دنا أُحادي مع شريط دنا أُحادي آخر. ويُبيّن الشكل 4 ـ 8 هذه السيرورة المسمّاة بالتهجين hybridization. تذكَّر أن أساس الدنا A يتزاوج دائماً مع T، وأن الأساس G يتزاوج دائماً مع C. في الشكل 4 ـ 8، يُعطي

التوافق التام في اليسار تطابقاً أقوى وأشد إحكاماً من ذاك الموجود في المجموعة غير المتوافقة تماماً. إن هذا النوع من التجميع الذاتي موجود في الطبيعة: يتضاعف الدنا بحيث يجعل الخلايا تتكاثر. وثمة كثير من التطبيقات التركيبية لهذا التعرُّف الجُزَيئي المتمِّم المستعملة في العلم النانوي.



الشكل 4 ـ 8: رسم توضيحي لسيرورة تهجين الدنا. يُري الجانب المتوافق كيف أن شريط الدنا يرتبط ارتباطاً صحيحاً مع متمّمه، ويُري الجانب غير المتوافق كيف أن الأخطاء يمكن أن تمنع الترابط

اقتُبست بعد موافقة: *Mirkin Group, Northwestern University*.

القرميد النانوي ولبِنات البناء

يجب تجميع البُنى النانوية من المكوِّنات ولبِنات البناء الأساسية المتمثِّلة بذرّات الـ 91 عنصراً طبيعياً. لكنْ ليس من المفيد عادةً البدء بذرّات إفرادية. فقد رأينا سابقاً قوة وبطء هذا النهج حينما ناقشنا بِناء بُنى نانوية في السلَّم الذرّي باستعمال مِجْهَر مِجسَّات المسح، وبخاصة إذا كنا نريد صنع مقدار كبير من المادة، لا بناء آلة نانوية واحدة. وقد قدَّر ريتشارد سمولِّي Richard Smally،

الذي نال جائزة نوبل لعام 1996 عن عمله في العلم النانوي، أن الآلات النانوية تحتاج إلى ما يصل حتى 19 مليون سنة لبناء بضعة أونصات من المادة ذرّة تلو أخرى، لأن عدد الذرّات في عيّنة من هذا القبيل يساوي نحو 6 إلى يمينها 23 صفراً. لو كان حجم الذرّة كحجم مِلعقة شاي ممتلئة بالماء لكان حجم ذلك العدد من الذرّات كحجم المحيط الهادئ.

إن ملء المحيط الهادئ بملعقة شاي تلو أخرى عملية شديدة البطء، ومثلها عملية بناء مادة جَسِيمة ذرّة تلو أخرى. والتجميع بمعدّل مليون ذرّة في الثانية يستغرق أيضاً مدة تساوي نحو 6 إلى يمينها 17 صفراً من الثواني لبناء حفنة من المادة المفيدة (نذكر على سبيل المقارنة أن الدَّيْن القومي للولايات المتحدة يساوي حالياً نحو 6 إلى يمينها 12 صفراً من الدولارات). قد يكون هذا مثبطاً إلى حد ما لأولئك الذين يتخيّلون روبوتات نانوية المقاس (تسمّى أحياناً بالمجمّعات) تجول هنا وهناك لتصنع كل شيء من السيارات حتى الساعات، إلا أن ثمة بدائل واعدة لصنع موادّ جَسِيمة قائمة على البُنى النانوية.

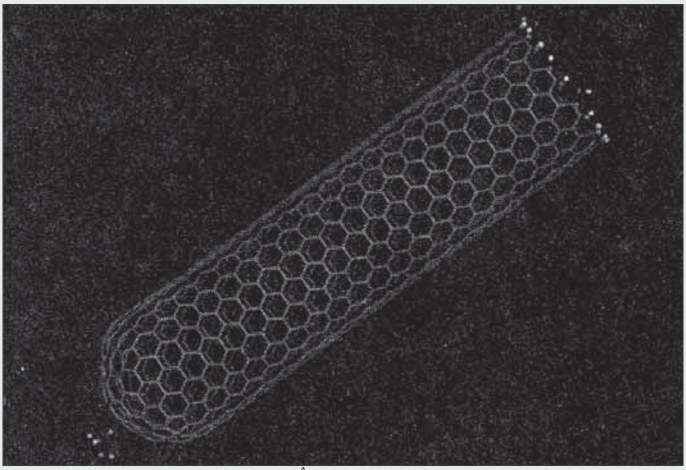
يبدأ بناء البُنى النانوية عادة بلبِنات بناء كبيرة من جُزَيئات المكوِّنات. ويمكن تخيُّل تلك اللَّبِنات على أنها قطع ليغو نانوية. وأحياناً، تكون تلك المكوِّنات جُزَيئات صغيرة عادية. فمثلاً، يُستعمل التفاعل الضعيف لمجموعة الكبريت مع سطح ركيزة ذهبي غالباً لبناء أغشية جميلة منتظمة لاصقة مترابطة من الجُزَيئات الطويلة ذات النهايات الكبريتية على سطح ذهبي. وتسمّى هذه الجُزَيئات كبريت الألكان alkane thiol. وكلمة «ألكان» تعني سلسلة طويلة من روابط الكربون ـ كربون من نفس النوع الموجود في البولي إثيلين، وهي تشير إلى الكبريت الموجود في النهاية التي ترتبط (تتجمَّع ذاتياً) بالسطح الذهبي لتكوين طبقة واحدة. ويمكن أن تكون سماكة الطبقة بضعة نانومترات، وأن يكون بُعداها الآخران كبيرين جداً. وهي لا تُبنى من ذرّات إفرادية، بل من جُزَيئات كبريت الألكان التي تتوضَّع على سطح الذهب. لقد كُتِب النص الخاص بالمبادرة القومية للتِقانة النانوية المبيّن في الشكل 1 ـ 1 على سطح ذهبي بحبر من كبريت الألكان باستعمال الطباعة النانوية بالقلم الغاطس.

وإضافة إلى الجُزَيئات المتنوعة التي توجد عادة في مخابر الكيمياء العادية، تُستعمل بعض لبِنات البناء شبه الجُزَيئية الحديثة جداً لتجميع بُنى نانوية. من تلك البُنى النانوية ما يُسمّى أنابيب الكربون النانوية carbon nanotubes (التي

كان أول من حضَّرها سوميو إيجيما Sumio Iijima في طوكيو) والقضبان النانوية nanorods التي تُصنع من السليكون أو أنصاف النواقل الأخرى، أو المعادن وحتى العوازل. تُصنع هذه القضبان النانوية باستعمال طرائق كيمياء المحاليل الذكية، لكنها تستطيع بعدئذ أن تتجمَّع ذاتياً في بُنى أكبر نانوية المقاس.

الخيوط الشائعة في التِقانة النانويّة: أنابيب نانويّة وأسلاك نانويّة

يعرف الجميع الغرافيت الذي تتكوَّن منه المادة السوداء في قلم الرصاص. ويستعمله البعض مزلِّقاً للآلات لأنه يتكوَّن في المستوى الجُزَيئي من صفائح كربونية تنزلق بعضاً على بعض باحتكاك ضئيل جداً. وتتألف صفائح الكربون تلك من ذرّات كربون مترابطة معاً في حلقات سُداسية على غرار شبك خُمّ الدجاج. ويهتم علماء النانو بها كثيراً لأنها حينما تُلفُّ على شكل أنبوب تكتسب بعض الخواص المدهشة. تُسمّى أسطوانات الغرافيت تلك أنابيب الكربون النانوية. وعندما تكون سماكة الأسطوانة صفيحة واحدة فقط من ذرّات الكربون، تُسمّى أنابيب نانوية أُحادية الجدار. وتُعتبر الأنابيب النانوية من أولى الموادّ النانوية المُهندَسة في المستوى الجُزَيئي حقاً، وهي تتصف بخواص فيزيائية وكهربائية مدهشة فعلاً.



الشكل 4 ـ 9: أنبوب كربون نانوي أُحادي الجدار

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Smalley Group, Rice University.*

ليس ثمة تقديرات دقيقة تماماً لمتانة الأنبوب النانوي المنفرد، إلا أن

المخابر بيَّنت أنها تتحمّل قوة شد تزيد بـ 60 مرة على قوة الشد التي يتحمّلها الفولاذ عالي الجودة. ووفقاً لبعض التقديرات يمكن تعليق مقطورة بليف من الأنابيب النانوية أرفع من شعرة الإنسان، مع أن أحداً لم يتمكَّن حتى الآن من صُنع أنبوب طويل بقدر يكفي للتيقُّن من ذلك. ويذهب آخرون إلى حدّ التّخمين أن الأنبوب الواحد يمكن أن يمتط من الأرض حتى الستراتوسفير stratosphere (الطبقة الثانية من الجو الأرضي التي ترتفع فوق سطح الأرض إلى ما بين 19 و48 كيلومتراً فوق سطح الأرض) وأنه يتحمَّل وزنه الذاتي. ويُؤكِّد كثير من علماء النانو أن الأنابيب النانوية ليست أمتن الموادّ التي صُنعت حتى الآن فحسب، بل هي من أمتن الموادّ التي سوف يكون من الممكن صنعها على الإطلاق. إن العبارات القاطعة التي من هذا النوع ممكنة الآن لأن التِقانة النانوية تمكِّن من الهندسة بتفاصيل بالغة الدقة، أي بناء موادّ التصميم ذرّة تلو أخرى بدلاً من بناء موادّ مركَّبة كبيرة الحبيْبات كما في الإسمنت وطبقات الخشب. ليست الأنابيب النانوية قوية فقط، بل هي خفيفة وطيِّعة أيضاً. وأنواع الكربون الأخرى، ومنها ألياف الكربون، موجودة قيد الاستعمال فعلاً في التجهيزات الرياضية عالية الجودة والطائرات لأنها تتصف بمقاومة شد تضاهي مقاومة شد الفولاذ والألمنيوم، لكنْ بوزن لا يزيد على كسر من وزنهما. ويمكن لموادّ الأنابيب النانوية أن تذهب بذلك إلى مستوى أعلى، إلا أن تصنيعها ما زال في بداياته. فحتى أعقد المصانع ما زالت لا تصنع سوى غرامات من الأنابيب النانوية في الأسبوع. لذا من الصعب الحصول حالياً على الأنابيب النانوية، فضلاً عن كونها غالية جداً. وإلى أن تتحسَّن تِقانة التصنيع، سوف يبقى استعمال الخواص الفيزيائية المدهشة لتلك الموادّ محدوداً جداً، مع أن بضعة المنتجات المحسَّنة بالأنابيب النانوية الأولى قد بدأت بالظهور على رفوف المتاجر على شكل مضارب تنس وغولف. وتُدخَل في هذه المنتجات مقادير صغيرة من الأنابيب النانوية ضمن موادّ عادية لتكوين مادة مركَّبة. لكن المنتجات التي تتكوَّن من موادّ مركبة تحتوي على أنابيب نانوية لا تستفيد كلياً من إمكانات تلك الأنابيب، إلا أنها تشير على نحو لافت إلى الإمكانات الكثيرة التي تنطوي عليها الأنابيب النانوية. ثمّة الكثير من الجوانب المدهشة في الخواصّ الفيزيائية للأنابيب النانوية، إلا أن خواصّها الكهربائية يمكن أن تكون أشد إثارة. فمن خلال النظر إلى شكل الأنبوب النانوي تنبَّأ علماء النانو بأن الإلكترونات يمكن أن

تقفز في الأنبوب إلى الأعلى والأسفل بوصفه سلكاً. وعندما جرى استقصاء ذلك وجد بعض العلماء أن الأنابيب سلكت سلوك الناقل الفائق superconductor تقريباً، ناقلة الكهرباء دون مقاومة. ووجد آخرون أنها سلكت سلوك أنصاف النواقل. وتقول النظريات الحالية إنها تستطيع أن تتصرّف كالنواقل الفائقة أو أنصاف النواقل، بناء على النسبة الدقيقة للأنابيب وعلى أنواع الموادّ الأخرى من غير الكربون التي تدخل في تركيب حاضنة الأنابيب (في عملية تدعى الإشابة doping). لا تُصنع جميع الأنابيب النانوية من الكربون فقط، بل ثمة أنابيب سليكون نانوية شائعة أيضاً. تُسمّى أنابيب الكربون النانوية عادة الأسلاك النانوية، والخواص الكهربائية الخصبة لهذه الأنابيب والأسلاك قيد الاستقصاء حالياً بغرض صنع تجهيزات إلكترونية نانوية. ويبلغ مقاس أنبوب الكربون نحو 1 بالمئة من مقاس خطوط التوصيل بين المكوِّنات الإلكترونية في آخر ما تُوصِّل إليه من الشرائح المكروية، وفكرة التوصيلات الفائقة الناقلية توفِّر إمكانية مغرية لتجاوز واحد من أكبر مصادر القلق في تصميم الشرائح الحالية، وهو التبديد الحراري الناجم عن تدفق الإلكترونات عبر الأسلاك المعدنية. يمثِّل البحث في الأنابيب النانوية والأسلاك النانوية وتصنيعها موضوعاً ساخناً لكل من العلماء والصناعة. وقد أُنشئت عدة شركات جديدة لصنعها، وأمام تلك الشركات سوق جاهزة لتسويق منتجاتها. وقد استعمل مهندسو مجموعة فيدون آفوريس Phaedon Avouris لدى الشركة IBM فعلاً أنابيب نانوية لصنع ترانزستورات ذات خواص تفوق خواص نظيراتها السليكونية، وأُنتِجت بعض البوّابات المنطقية القائمة على الأنابيب النانوية فاتحة السبيل إلى الحَوْسَبة في السلَّم النانوي. وليس معروفاً إنْ كانت الأنابيب والأسلاك النانوية موجودة طبيعياً، وهي من بين العوائد المبكرة للاستثمار في العلم والتِقانة النانويين.

أدوات تصوير السلوك في السلَّم النانوي

الكيمياء التركيبية هي علم يستعمل مبادئ مفهومة تماماً لتكوين بُنى جُزَيئية كبيرة. أما فهم كيفية تكوين موادّ نانوية وماهيّة خواصّ تلك الموادّ فهو مركزي في علم النانو. ووفقاً لما أكَّدناه في الفصول السابقة تمتلك الموادّ في السلَّم النانوي خواص تامة الاختلاف عن خواص الموادّ الموجودة في السلَّم الذرّي (الغازات البسيطة) أو البُنى الموسَّعة التي من قبيل المعادن والبوليمرات

والسيراميكات. والأفكار المفاهيمية والنظرية، وأفكار النَّمْذَجة الخاصة بالسلوك النانوي، على درجة كبيرة من الأهمية لتطوير تقنيات للإنتاج الكمّي في السلَّم النانوي.

أما الأفكار الجوهرية ذات الصلة فهي تلك التي ذكرناها في الفصل الثالث: التأثيرات الكهربائية المتبادلة وقانون كولون، وقواعد السلوك والتصميم في الميكانيك الكمومي، والتفاعل مع الضوء، والمفاعيل المتبادلة بين المكوِّنات والتي تمثِّل إلى حد بعيد تجلّيات للقوى الكولونية فيها. لذا فإن الطرائق المعتادة في الفيزياء النظرية والكيمياء النظرية والهندسة الكهربائية وعلم الموادّ تهيمن على كل من المفاهيم المستعملة لفهم البُنى النانوية وعلى الحسابات الضرورية للتنبُّؤ بالسلوك. وهي توحي بتصميم البُنى والتجهيزات في السلَّم النانوي.

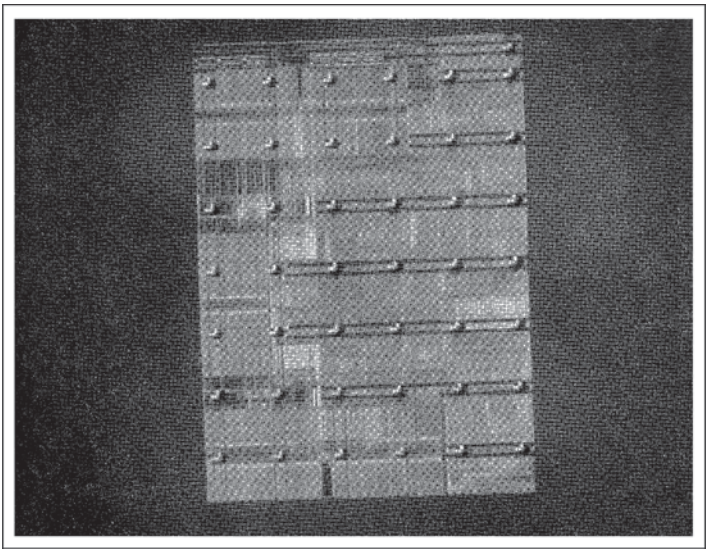
وقد كان استعمال الميكانيك الكمّومي للتنبُّؤ بالبُنى الجُزَيئية الحقيقية واحداً من انتصارات الكيمياء في القرن العشرين. وتوسيع هذه النماذج للتعامل مع بُنى نانوية أكبر يتقدَّم بسرعة كبيرة. وإن هذه الحسابات تجري بواسطة حواسيب كبيرة، ويمكن مزجها مع تنبُّؤات سابقة تقوم على الميكانيك العادي. وتمثِّل التنبُّؤات الحاسوبية طريقة من طرائق التصميم في السلَّم النانوي، لكنها يمكن أن تكون أكثر فائدة حين مزجها مع الحدس والخبرة والإلهام.

التصميم النانوي بمساعدة الحاسوب

ما زالت تِقانة صناعة الشرائح السليكونية القائمة على نصف ناقل متمِّم أكسيد المعدن (سيموس) complementary metal oxide semiconductor (CMOS) واحدةً من الطرائق المفتاحية لصنع الشرائح المكروية التي من قبيل معالِجات الحاسوب الصِّغْرية. إن المتطلب العلمي الجوهري الوحيد في تصميم السيموس هو توصيف سلوك التيارات التي تتحدَّد بقانون أوم. ومع ذلك ما زال تجميع بُنية سيموس شديدة التعقيد كتلك المبيّنة في الشكل 4 ـ 10 شديد الصعوبة من الناحيتين المادية والمالية (إنه لمن الصعب صنع الأدوات والأقنعة، وإجراء الطباعة الضوئية، وتجميع ملايين الشرائح ضمن حيِّز ضئيل بتكلفة منخفضة). لصنع شرائح حديثة من قبيل تلك المستعملة في الإلكترونيات الاستهلاكية من الضروري تجميع ملايين الترانزستورات على شرائح سليكونية وتسيير الشِحنة عبرها على نحو يمكِّن من تنفيذ الخوارزمية والحسابات التي صُمِّمت الشريحة

لإجرائها. في الأيام الأولى من تصميم الشرائح، كان المهندسون يرسمون الدارات التي يريدونها يدوياً على لوحات، وأقامت الشركات أقساماً فنية تضمّ أفراداً متخصّصين لرسم تلك الأشكال بدقة (يدوياً بواسطة قلم تحت عدسة مكبرة) لتكون قوالب لصنع الأقنعة. لكن الشرائح في تلك الأيام احتوت على بضع عشرات من المكوِّنات فقط. أما تصميم شرائح تحتوي على ملايين المكوِّنات فهو أعقد كثيراً من أن يقوم به أفراد يدوياً.

لهذه الأسباب، تصمِّم الحواسيب معظم الشرائح الإلكترونية. وثمة برامج تُسمّى برامج التصميم بمساعدة الحاسوب مكتوبة خاصةً لتصميم الشرائح التي تقوم بوظائف معيّنة. ويصمِّم المهندسون الشرائح في مستوى البرمجة العالي مستعملين لغات حاسوبية لوصف العتاديات المتخصِّصة، أو بيئة رسم بيانية تحتوي على مكوِّنات مصمَّمة سلفاً.



الشكل 4 ـ 10 : سطح شريحة سيموس

اقتُبست بعد موافقة *Tom Way* من *IBM*.

تُستعمل برامج التصميم بمساعدة الحاسوب لتصميم بُنى ذات مقاسات أكبر كثيراً من سُلَّم النانومتر. وبُنى السيموس الشائعة ما زالت ذات مقاسات من رتبة مئات أو آلاف النانومترات، وهي مقاسات الطبيعية. أما عندما تكون البُنى في حيِّز السلَّم النانوي فإن قانون أوم لا يكون صالحاً دائماً، بل توصف

حينئذ ظاهرة حركة الشِحنة بالميكانيك الكمّومي، ويصبح فهم كيفية تدفّق التيار أشد تعقيداً. وتتصرّف الترانزستورات المعتادة في السلَّم النانوي بطريقة مختلفة تماماً عن المتوقَّع. لذا لا يوجد حتى الآن أيّ برنامج للتصميم بمساعدة الحاسوب في السلَّم النانوي. وتقوم بعض المخابر بدراسة هذا المسألة، لكنْ إلى أن نفهم سلوك البُنى النانوية الإفرادية فهماً جيداً فإن برنامجاً للتصنيع بمساعدة الحاسوب وتجميع تجهيزات نانوية في بُنى منطقية سوف يبقى تحدّياً استفزازياً.

عقلية السرب: الحَوْسَبة عديمة الهيئة

غدت الشرائح المكروية منذ سبعينيات القرن العشرين أسرع وأكثر تعقيداً. وتستطيع المعالِجات الحديثة على سبيل المثال جمع أعداد مكوَّنة من 64 بتاً (أكثر من 19 منزلة عشرية) بخطوة واحدة، في حين أن الحواسيب الأولى كانت تعمل بـ 8 بتات فقط (أقل من ثلاث منازل عشرية). ولدعم لغات البرمجة العالية المستوى تجب برمجة عشرات تعليمات الرِّماز المكروي في دارة الشريحة. على سبيل المثال، يحتوي رماز إنتل الخاص بالمعالج بنتيوم على نحو 100 تعليمة عامة الاستعمال. وهذا يعني أن المعالِجات الحديثة يجب أن تحتوي على ملايين المكوِّنات وعلى تعليمات معقدة مصطفّة في رتل (يُسمّى عادة المُوارِد pipeline). ويعكس بنيان تلك المعالِجات 20 سنة من التنقيحات والتشذيبات والتعقيدات. وبرغم أن الإلكترونيات الجُزَيئية سوف تكون ناجحة تجارياً لكثير من التطبيقات فإن كثيراً من العلماء والمهندسين يرى أنه من غير المرجَّح أن تكون تجهيزات من نوع المعالِج بنتيوم، بتعقيد يصل إلى 10 ملايين ترانزستور، واقعيةً خلال السنوات القليلة القادمة، وخصوصاً باستعمال تقنيات التجميع البطيئة والخشنة المتوفرة حالياً. لكنّ الأكثر ترجيحاً هو أن الجيل الأول من «المعالجات النانوية» الجُزَيئية سوف يكون بسيطاً جداً وقادراً على تنفيذ بضع عمليات أساسية فقط من قبيل «اتبع المعالِج المجاور لك» و«انتقل بسرعة إلى الموقع التالي». إلا أن السماحيات والتقنيات المستعملة حالياً لن تسمح للمعالِجات بتنفيذ مهامها بدقة ويقين محدّدين.

من ناحية أخرى، إذا كانت مجموعة المعالِجَة تحتوي على الملايين،

أو حتى المليارات، من تلك الجُزَيئات، فإن أنواعاً كثيرة من الأخطاء سوف تختفي في المتوسطات الحسابية. هذه هي طريقة عمل المجتمعات إلى حد بعيد. لا يوجد لدى مجتمع النمل معالِج مركزي وحيد يخبره بكيفية بناء عُشّه، ولا يوجد لدى النحل ما يدلّه على طريقة بناء خليّته، أو لدى الناس ما يخبرهم بكيفية بناء مُدنهم. ولا تتهدَّم الأعشاش والخلايا والمدن بسبب عدم تمكُّن بنَّاء واحد من بنائها، وهي لا تُخفق في أداء وظيفتها وفقاً للمتوقع منها، حتى بوجود الأوبئة والزلازل، أو المتنزّهين المفسدين. يجب تدمير الغالبية العظمى للقضاء على الكل. فإذا كان من الممكن بناء الحواسيب بهذه الطريقة أصبحت مسألة زيادة الطاقة الحاسوبية بسيطة كبساطة إضافة معالِجات إليها. حينئذ سوف تزداد وثوقية المنظومة وسلامتها بأسرها، إلا أن ذلك يتطلب إعادة نظر جوهرية بطريقة صُنع وبرمجة الحاسوب الحالية. يُسمّي علماء ومهندسو الحاسوب الذين يقومون بهذه الدراسة ذلك التخصُّص بالحَوْسَبة عديمة الهيئة amorphous computing، أو الحَوْسَبة السِّربية swarm computing، لأنها تعمل على غرار أسراب الحشرات. ومع أن هذا البحث ليس علماً نانوياً حصراً، فإن بوسعه أن يكون مفتاحاً للحَوْسَبة الجُزَيئية أو الكمّومية.

5 ـ نقاط وأماكن هامّة: الجولة الكبرى

■ الموادّ الذكيّة 80

■ المُحِسَّات 81

■ بُنى حيويّة نانوية المقاس 83

■ التقاط الطاقة وتحويلها وخزنها 84

■ البصريّات 85

■ المغانِط 94

■ التصنيع 95

■ الإلكترونيات 96

■ الإلكترونيات مرّة أخرى 97

■ النَّمْذَجة 97

أصبح العلم والتِقانة النانويان موضوعاً مهيمناً لدى كثير من هيئات البحث في شتّى أنحاء العالم. وأفضت الجهود المبذولة في الولايات المتحدة، وفي عدة دول أخرى، إلى إنشاء مراكز للعلم النانوي تتمركز عموماً في الجامعات الرئيسية. وفي هذا الفصل، سوف نقوم بجولة قصيرة في بعض مجالات التطوير الرئيسية في العلم والتِقانة النانويين. أما الجولة الكبرى فيمكن أن تُستكمل في أي من المراكز الكثيرة في العالم، لكننا سوف نركِّزها في البحوث التي تُجرى في مركز التصنيع النانوي والتجميع الذاتي الجُزَيئي في جامعة نورثوِسترن، وهو أول مركز للعلم والتِقانة النانويين تموِّله الحكومة الاتحادية الأميركية. ونظراً إلى أن العلم والتِقانة النانويين يُجريان في مخابر حكومية وصناعية وأكاديمية في شتى أنحاء العالم سوف تتضمّن هذه الجولة أيضاً توقّفات في بعض المختبرات الصناعية الرئيسية، وفي مخبر مثير في أوروبا.

الموادّ الذكيّة

إن مايكل فازيليوسكي Michael Wasielewski هو رئيس قسم الكيمياء في جامعة نورثوِسترن. وهو مواطن من شيكاغو مُغرَم بالكشافة، وقد أمضى عدة سنوات في العمل لدى مخابر آرغون القومية Argonne National Laboratory قبل الانتقال إلى جامعة نورثوِسترن. وأحد مجالات البحث الرئيسية التي يهتم بها هو زُمرة معقّدة من الموادّ البوليمرية تُسمّى البوليمرات الكاسرة للضوء photorefractive polymers. تحتوي هذه البُنى الاستثنائية على شحنات إلكترونية حُرّة على غرار المعادن تقريباً. ويمكن تحريك الشحنات الحرة إلى مواضع جديدة إما بتسليط ضوء على البوليمر أو بوضع البوليمر في حقل كهربائي. بعدئذٍ يمثل موضع تلك الجُسيمات المشحونة نوعاً من الرماز code يمكن أن يُقرأ بتسليط أضواء ذات ألوان مختلفة على البوليمر المرمَّز تجعله يعمل وكأنه نسخة نانوية من قارئ الرماز القضباني المستعمل في المتاجر. وتعدُّ البوليمرات الكاسرة للضوء على درجة عالية من الأهمية بوصفها تجهيزات خزن للمعلومات ذات كثافة خزن تتجاوز كثيراً أفضل بُنى الخزن المغنطيسية المتوفِّرة.

إن البوليمرات الكاسرة للضوء معقّدة جداً، وهي نوع مدهش من الموادّ الذكية في السلَّم النانوي. ويدلّ المصطلح «مادة ذكية» في علم النانو على أي مادة تُهندَس في السلَّم النانوي لتأدية مهمة محددة. ويمكن أحياناً للموادّ الذكية أن تكون ديناميكية أيضاً، أي إن المادة يمكن أن تغيِّر خواصّها أو بُنيتها

الأساسية بناء على أمر خارجي. ومن الأمثلة البسيطة على المادة الذكية الديناميكية زجاجُ السيارات الذاتي التلوُّن، الذي يكون صافياً معظم الوقت ويصبح مُعتِماً حين تعرُّضه لضوء شديد، فيقي بذلك السائق منه. وفي حالة البوليمر الكاسر للضوء، تُصمَّم قابلية تحريك الشحنات بالضوء أو الحقل الكهربائي في المادة في مستواها الأساسي جداً، وهذا ما لا يمكن فعله لأي مادة من دون التِقانة النانوية والمعالَجة في السلَّم النانوي.

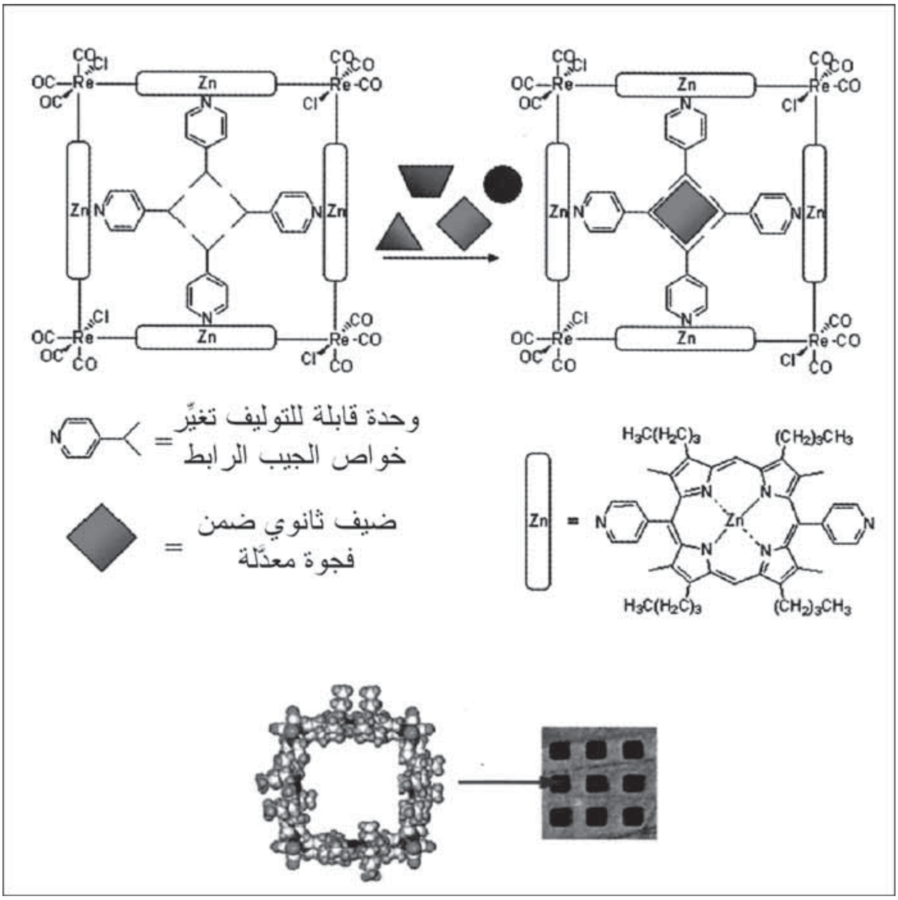
يستعرض الفصل السادس موضوع الموادّ الذكية بمزيد من الشمولية من حيث كيفية تصميمها وتصنيعها، إضافة إلى بعض التطبيقات المتوقَّعة لها.

المُحِسَّات

يُعلِّم جو هَبّ Joe Hupp الكيمياء في جامعة نورثوِسترن، وقد عمل أثناء حياته العلمية القصيرة في كثير من مجالات الكيمياء والموادّ المختلفة. وهو نشيط وهادئ وعاطفي ولامع ومُفْعَم بالشباب. وكان أحد مجالات اهتمامه الرئيسية تطوير موادّ مُحِسَّة، وبخاصة تلك التي تُصمَّم في السلَّم النانوي. والمُحِسَّات هي بُنى تستجيب بطريقة مميَّزة لوجود شيء نرغب في كشفه. وثمة مُحِسَّات لدرجة الحرارة والماء والضوء والصوت والكهرباء وجُزَيئات معيّنة وأشياء حيوية أخرى من قبيل الجراثيم والموادّ السامّة والمتفجّرات والدنا.

وإحدى الطرائق التي يحاول بها هَبّ تطوير مُحِسَّات هي استعمال خواصّ التعرُّف الجُزَيئي. فقد صنع بعض الجُزَيئات الجيدة والمعقدة إلى حد ما، وسمَّاها المربّعات المعدنية الجُزَيئية التي يُري الشكل 1,5 واحداً منها. وقد صَّمم تلك المربّعات لتتعرَّف جُزَيئات مُعيّنة تُسمّى **المحلَّلة** *analyte* (أي المرغوب في تحليلها). وبتصميم المربّعات الجُزَيئية بحيث تكون لكثافة الإلكترونات الجُزَيئية أشكال وأنماط هندسية معيّنة تمكِّن هَبّ ومجموعته من تحقيق شيء مشابه لحذاء السِّندريلا: تتطابق قدم المحلَّلة مع حذاء المربّع الجُزَيئي، في حين أن الجُزَيئات الأخرى ذات الأشكال والأحجام الأخرى لا تحقّق ذلك. وعندما يتعرَّف المربَّع الجُزَيئي الجُزَيءَ المحلَّل ويلتقطه علينا أن نكون قادرين على معرفة أن الالتقاط قد حصل فعلاً، ويتحقَّق ذلك بتسليط ضوء على المربّع. وتمتصّ جُملة المربّع والمحلّل طاقة من الضوء في مجالات لونيّة (مجالات تردّدية أو أطوال مَوجية مختلفة) تختلف عن تلك التي يمتصّها المربّع وحده أو المحلَّل وحده. وهذا يعني أنه إذا راقبت المحِسَّ تجد أنّه غيَّر

لونه بوجود المحلَّل. وهذه المُجِسَّات حسّاسة بقدر يكفي لكشف أقل من عشرة جُزَيئات من أي محلَّل، ولذا قد لا يُلاحَظ التغيُّر بالعين المجرّدة في الاختبارات العالية الدقّة، إلا أنه ليس من الصعب بناء تجهيزات مخبريّة تستطيع رؤيته، وبذلك تكون المربّعات من أكثر المُجِسَّات التي صُنعت حساسية.



الشكل 5 ـ 1: علم النانو الكيميائي التركيبي، والمربّعات الجُزَيئية الآسرة للمعادن

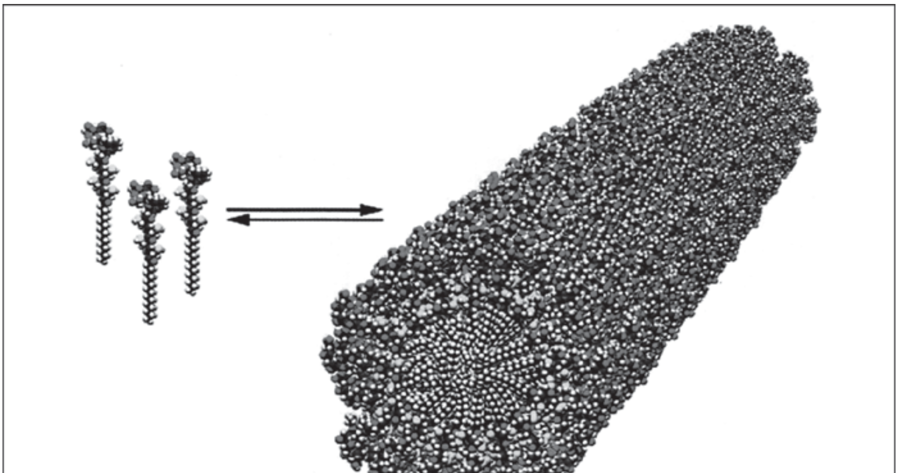
اقتُبست بعد موافقة *Hupp Group, Northwestern University*.

تُعتبر تِقانة المُجِسَّات بالغة الأهمية لمراقبة البيئة والتحكُّم فيها. عِلماً بأن مفهوم المُجِسَّات ليس جديداً، فقد طوَّر همفري ديفي Humphrey Davy مصباحاً لعمّال المناجم يتحسَّس وجود الغاز في مناجم الفحم في بداية القرن التاسع عشر. أما التِقانة النانوية فسوف تجعل فئات جديدة كاملة من المُجِسَّات

الفائقة الحساسية ممكنة. وسوف نناقش في الفصل السابع بعض المُحِسَّات التي صُنعت في السلَّم النانوي، إضافة إلى خواصّها العامة، وسبب كونها واحدة من أولى التطبيقات التجارية الرئيسية للتِقانة النانوية.

بُنى حيويّة نانوية المقاس

يُعلِّم سام ستَبّ Sam Stupp الكيمياء وعلم الموادّ والطب لدى جامعة نورثوِسترن. وقد نشأ ستَبّ في كوستاريكا ودرس علم الموادّ وموادّ الأسنان في وقت مبكر. وهو يتحدث بعدة لغات، ويهتم بالآداب والفنون، إضافة إلى أنه خبير بالطعام وذو بصيرة علمية. ويترأس معهداً في نورثوِسترن مكرَّساً للترميم البشري، أي إن أحد أهداف بحوثه الرئيسية هو استعمال التجميع الذاتي والبُنى النانوية لترميم أجزاء من جسم الإنسان حين تعرُّضها للأذى، وذلك عوضاً عن إزالتها أو استبدالها. وأحد اهتمامات بحوثه الرئيسية، واهتماماتِ علم النانو عموماً، هو ما يُسمّى البُنى الحيوية النانوية التي تُصمَّم في السلَّم النانوي وتستطيع محاكاة سيرورة حيوية أو التأثير فيها، أو التفاعل مع كينونة حيوية.



الشكل 5 ـ 2: قالب جُزَيئي ذاتي التجميع لعظم صُنعي. يتجمَّع القضيب الطويل ذاتياً من المكوِّنات الجزيئية الصغيرة، ويتكوَّن نسيج العظم الطبيعي على السطح الخارجي

اقتُبست بعد موافقة: *Stupp Group, Northwestern University*.

يتجلّى أحد أمثلة البُنية الحيوية النانوية في التجميع الذاتي للعظم الصُّنعي

الذي طوَّرته مجموعة ستَبّ أخيراً. ويوضح الشكل 5 ـ 2 السيرورة العامة، وفيها ترتبط الجُزَيئات التي يتألف منها العظم معاً بواسطة روابط كيميائية. من ناحية أخرى، تتصف هذه الجُزَيئات بتأثيرات متبادلة في ما بينها أضعف من الروابط الفعلية (على غرار التأثيرات التي تكوِّن التوتّر السطحي في الماء)، إلا أنها تجمع الجُزَيئات معاً في شكل مُعيَّن، هو أسطوانة في هذه الحالة. وقد صُمِّمت جُزَيئات العظم بحيث تملأ حيِّزاً بطريقة معيّنة كي تتجمَّع تلقائياً وتكوِّن الشكل المطلوب متراصَّة بقدر يكفي لجعل العظم قوياً جداً. ويمكن جعل بُنية الجُزَيئات المتراصّة متوافقة مع جهاز الإنسان المناعي بالاختيار الصحيح لمجموعات الرأس head groups من الجُزَيئات، أي مجموعات الذرّات التي تكوِّن القَوْقَعة الخارجية لقالب العظم الصنعي. وتُصمَّم القوقعة الخارجية أيضاً بحيث يبدأ العظم الطبيعي بالتكوُّن حولها كما يتكوَّن المَرْجان على صخور الشاطئ أو الذهب على قطعة من المجوهرات حين طَلْيِها. وهذا هو مفتاح الترميم البشري الذي يمكِّن الجسم من إصلاح النُسُج المكسورة أو المتأذية إصلاحاً طبيعياً بدلاً من الاستعاضة عنها بصفيحة معدنية أو سيراميكية.

ونظراً إلى أن المملكة الحيوية ممتلئة بالبُنى النانوية فإن التطبيقات والاستقصاءات الحيوية الطبية تمثِّل جزءاً رئيسياً من مشهد العلم النانوي. وقد كرّسنا الفصل الثامن لنظرة إجمالية سريعة نلقيها على بعض المجالات الكثيرة للتِقانة النانوية الحيوية الطبية.

التقاط الطاقة وتحويلها وخَزْنها

إن مايكل غريتسل Michael Graetzel كيميائي لدى جامعة لوزان بسويسرا. وهو ذو شعر ملتفّ، وبسمة خجولة جذابة، وحماسه لما يفعله هائل جداً. وقد كرَّس كثيراً من حياته المهنية لاختراع ودراسة وتطوير البُنى النانوية الخاصة بالتقاط الطاقة وتحويلها وخزنها وتوزيعها. ونظراً إلى أن المجتمعات الصناعية تحتاج إلى مقادير هائلة من الطاقة في المنازل وأماكن العمل فإن إدارة الطاقة تمثِّل أحد المجالات الرئيسية في علم النانو.

تجلّى أول إنجاز رئيسي لغريتسل في تطوير ما يُسمّى الآن بخلِيّة غريتسل Graetzel cell. يسُتعمل في هذه الخلِيّة جُزَيء صَبْغي لالتقاط الطاقة من الشمس. يمتصّ الجزيء ضوءَ الشمس، فينتقل إلى مستوى طاقة أعلى فينفصل منه إلكترون يذهب إلى جُسيْم نانوي مكوَّن من بلّورة بيضاء تُسمّى ثنائي أكسيد

التيتانيوم. ثم تُترك الشحنات المنفصلة لتتّحد معاً باستعمال مجموعة من التفاعلات الكهركيميائية (يبقى الجزيء الصبغي موجب الشِحنة بعد انتقال الشحنات السالبة إلى جُسيْم ثنائي أكسيد التيتانيوم). وفي تلك التفاعلات يتحرّر جزء من الطاقة التي يلتقطها الجزيء من الشمس على شكل تيار كهربائي يمر في دارة خارجية. وقد استُعملت خلايا غريتسل أولاً لإضاءة موازين الحمَّامات والساعات السويسرية، إلا أنها تُعتبر مثالاً للجهود الكبيرة التي تُبذل في شتّى أنحاء العالم لالتقاط ضوء الشمس وتوفير مصادر طاقة نظيفة آمنة رخيصة وذات مردود جيد. وتتجاوز كفاءة خلايا غريتسل حالياً 7 بالمئة، ويمكن إنتاجها باستعمال تقنيات الشاشة الحريرية، وهذا ما يجعلها أرخص صُنْعاً من معظم الخلايا الكهرضوئية المألوفة.

يدور الفصل التاسع حول بصريّات الجُسيْم النانوي من حيث التقاط الضوء والتحكُّم في إصداره ونقله ومعالجته. ونظراً إلى أن الضوء هو واحد من أهمّ مصادر الطاقة، يُعتبر هذا المجال من العلم والتِقانة النانويين بالغ الأهمية للتعامل مع احتياجات العالم من الطاقة.

البصريّات

إن تشين تانغ Chin Tang هو كيميائي لدى الشركة Eastman Kodak في روشستر. وقد اقترن اسم كوداك دائماً بنوع واحد من البصريات، أي النوع الذي يمكّننا من وضع ذكرياتنا في الصور. يتكلم تانغ بلطف وجاذبية، ويحجب تواضُعه طبيعتَه الخلاَّقة التي اتّسم بها خلال حياته العلمية. وفي عام 1987، كانت مجموعة تانغ أول من يستعرض أنه يمكن استعمال الجُزَيئات العضوية لتوليد ضوء من الكهرباء مباشرة وبكفاءة. وما اخترعه تانغ في تلك السنة أصبح معروفاً بالثنائي العضوي المشعّ للضوء(organic light emitting diode (LED، وأشارت كل الدلائل إلى أن هذه التِقانة سوف تكون تِقانة رئيسية للإضاءة في مجالات مختلفة، من واجهة السائق في السيارة حتى الإضاءة المنزلية والشاشات الحاسوبية.

استند عمل تانغ الأصلي إلى الخواصّ الجُزَيئية ولم يعتمد أي بُنية في السلَّم النانوي. إلا أن أعمالاً أكثر حداثةً في مختلف أنحاء العالم أوضحت بجلاء أن النزول بِبُنى تلك الثنائيات المشعّة إلى السلَّم النانوي يؤدّي إلى زيادة كبيرة في الكفاءة والتحكُّم والعمر، إضافة إلى تخفيض التكلفة.

إن توليد الضوء من الكهرباء، كما يحصل في تلك الثنائيات المشعّة، هو

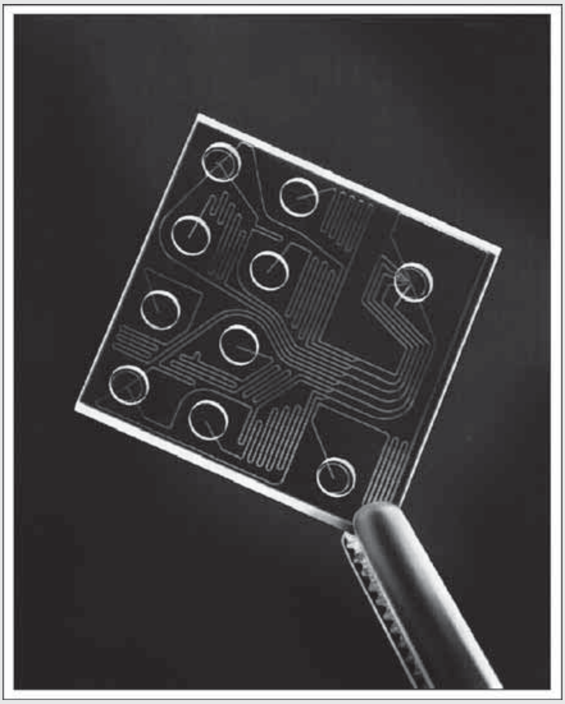
من حيث المبدأ العملية المعاكسة للتركيب الضوئي الطبيعي أو لما يحصل في خلِيّة غريتسل المذكورة آنفاً في هذا الفصل. وتُستَعمل الكهرباء لتوليد ضوء بواسطة البُنى المشعّة للضوء، في حين أن الضوء يُلتقط بواسطة الخلايا الكهرضوئية لتوليد كهرباء. وكل من هذين المجالين هو مجال رئيسي لتطوير العلم النانوي، وكلاهما مطروحان في الفصل التاسع.

تجرِبة على إبهام يدك: مَخبر على شريحة

إذا قرأت أي مقترح علمي تقريباً فإنك سوف تتفاجأ بمقدار المال اللازم لتحقيق حاجتين بسيطتين أساسيتين هما الحيِّز اللازم للتجهيزات المخبرية والأشخاص الذين سوف يشغِّلونها. تحتل الأجهزة العلمية حيِّزاً كبيراً نسبياً، وهذا صحيحٌ، إلا أن معظم حيِّز المَخبر يُستهلك بالممرّات والطاولات والمساحات المفتوحة ولوحات المفاتيح والشاشات وأغطية المنصّات وتجهيزات الطوارئ وغيرها من احتياجات العاملين في المخبر. فإذا استطعت أَتْمَتة جميع المهامّ البشرية في المخبر وتقليص كل هذا المكان أمكنك جعل الأشياء أكثر تراصّاً وأعلى كفاءةً. وفي بعض الحالات قد تستطيع جعلها على درجة من التراصّ والكفاءة تمكِّنك من مكاملة المخبر برمّته على شريحة مكروية. وبتخفيض هذه التكاليف والنفقات الإضافية تجعل البحث العلمي أبسط وأسرع وأرخص، إضافة إلى التمكُّن من إجراء مئات، أو حتى آلاف، التجارب في الوقت نفسه.

تلك هي الفكرة الأساسية لتِقانة بازغة سُمِّيت التسمية الموفَّقة **مَخْبَر على شريحة** *lab-on-a-chip* (انظر الشكل 5 ـ 3). لأول وهلة تبدو هذه المخابر الضئيلة المؤتمة كأخواتها من التجهيزات الإلكترونية، فهي تكوَّن عادة على سطوح سليكونيةً، وتوصل الخلايا الضئيلة معاً بواسطة وصلات مكروية أو نانوية المقاس.

لكن الفارق بينها هو أن الوصلات في المخبر على شريحة لا تنقل جميعاً الكهرباء. فكثير منها يمثِّل قنوات لنقل سوائل من خزّانات ضئيلة توضع على الشريحة أثناء التصنيع. والخلايا الوظيفية تختلف أيضاً. ففي الشريحة المكروية يمكن لتلك الخلايا أن تكون ذاكُرات أو بوّابات منطقية، أما في المخبر على شريحة فهي غالباً عناصر مزج وخزّانات ومفاعلات حيوية أو كيميائية.



الشكل 5 ـ 3: مخبر على شريحة

اقتُبست بعد موافقة: *Agilent Technologies, Inc*.

يُصنع المخبر على شريحة باستعمال تِقانات السليكون الراسخة، ومنها الطباعة الضوئية والحفر. لكنّ صُنع المخبر على شريحة يختلف عن صُنع الشرائح الإلكترونية لأن الأشكال فيه يجب أن تُصمَّم في ثلاثة أبعاد، لا بُعدَين. وسبب التصميم الثلاثي الأبعاد هو أن الماء لا يستطيع التدفّق في خرطوم مسطّح كما تتدفّق الكهرباء في سِلك صفيحي. والتصنيع السليكوني الثلاثي الأبعاد ليس مفهوماً تماماً كذاك الثنائي الأبعاد، وبعض اللدائن والموادّ الأخرى اللازمة للتعامل مع السوائل تختلف عن تلك اللازمة للتعامل مع الكهرباء. إن هذه المسائل تجعل من تصنيع المخبر على شريحة مجالاً نشطاً من الهندسة.

والتقانتان المفتاحيتان الأخريان لصنع المخبر على شريحة هما **السوائليات المكروية** *microfluidics* و**السوائليات النانوية** *nanofluidics*، وهما تقانتان للتحكُّم في حركة السوائل عبر قنوات مكروية أو نانوية المقاس. وعندما تكون حجوم السوائل بهذا الصِّغر لا يمكنك دائماً دفعها إلى الأمام

باستعمال مِضَخّات وصِمامات، لأنك لا تمتلك الدقة اللازمة ولأن تصميم ومكاملة تلك الأجزاء الصغيرة المتحركة شديدا الصعوبة. لذا، وحين الحاجة إلى حجوم ضئيلة جداً من السوائل، تُستعمل تقنيتان في تجهيزات المخبر على شريحة هما التهجير الكهربائي electrophoresis والنضح الكهربائي electroosmosis. تعمل هاتان التقنيتان بتطبيق جُهد كهربائي على طول القناة بالاتجاه الذي يجب أن يتدفق السائل فيه. وفي التهجير الكهربائي يؤثر هذا الجهد في الشوارد الموزّعة عبر السائل الذي سوف يُحرَّك، دافعاً إياها اعتماداً على القوى الكولونية. حين اتباع هذا النهج تتحرك شوارد السائل بسرعات تتناسب عكساً مع كتلها، وهذا ما يؤدّي إلى تفرّقها وتحرُّك الجسيْمات الخفيفة بسرعة أكبر من سرعة الثقيلة. وهذا الفصل بين الجُسيْمات وفقاً لكُتلها هو ما يجعل التهجير الكهربائي مفيداً في تحليل الموادّ المركَّبة، وخاصة في تحليل الدنا. أما النضح الكهربائي فيجعل الشحنات الموجودة على جدار القناة تؤثر في طبقة رقيقة من الشوارد الموجودة عند ملتقى الجدار والسائل، فيدفع ذلك عمود السائل برمّته إلى الأمام بنفس السرعة كما تتحرك سدّادة في أنبوب.

باستعمال هاتين الطريقتين لتحريك السوائل في ما بين عناصر المزج والمفاعلات أمكن التحكُّم في التفاعلات بدقة، وأصبح المخبر على شريحة حقيقية. تصنع شركات من قبيل Affymetrix (التي تُنتِج الشريحة GeneChip) وAgilent (التي تصنع الشريحة LabChip) تجهيزات مخبر على شريحة لاستعمالها في التحليل الجيني. ويُؤمَل أن تتطوَّر هذه الشرائح حتى يصبح بالإمكان استعمالها في تطبيقات مستوصفات الرعاية الطبية حيث يمكن للطبيب أن يُجري للمريض تحليلاً فورياً للدم أو لأي عيّنة أخرى يأخذها من جسم المريض. ويمكن استعمالها أيضاً للتزويد بالدواء، خاصة في الحالات التي يجب فيها التزويد خلال مدة طويلة استجابة لتغيّرات كيمياء الجسم (كما في حالة مرضى السكّري مثلاً). وفي المستقبل البعيد يمكن للمخبر على شريحة أن يعمل بوصفه إطاراً للحَوْسَبة بالدنا، لأن التجارب المبكرة في ذلك الحقل تُجرى في مكروليترات (بضعة أجزاء من المليون من الليتر) من المحلول، لكنها تحتاج إلى تحليل للنتائج واسع النطاق كي تكون ذات فائدة. ويمكن استعمال المخبر على شريحة أيضاً في المكّوك أو المركبات الفضائية إذا كانت ثمة حاجة حقيقية إليها في الفضاء.

التفاف آخر على الأشياء: الحَوْسَبة الكمّومية

سوف يوفِّر لنا تقليص أشكال الشرائح المكروية إلى السلَّم النانوي إمكانَ جعل قانون مور يستمر عدة أجيال شرائح إضافية، إلا أن التِقانة النانوية توفِّر أيضاً بعض الإمكانات المثيرة للتفوّق حتى على ذلك التوجُّه المثير. ومن تلك الإمكانات ما يُعرف **بالحَوْسَبة الكمّومية** *quantum computing* التي تستعمل الخواصّ الكمّومية للجُسيْمات في الحَوْسَبة. لكنْ، ماذا يعني ذلك فعلاً؟ يكمن أحد سُبُل الحَوْسَبة الكمّومية عند صديقنا الإلكترون متعدِّد الأغراض.

تمتلك الإلكترونات، إلى جانب الخواصّ التي نألفها من قبيل الكتلة والشِحنة، عدداً من الخواصّ الكمّومية، أحدها هو **التدويم** spin. ليست ماهيّة التدويم الفعلية هامّة لنا هنا، إلا أن ما يهمّنا هو أن قيمته يمكن أن تساوي 1/2+ أو 1/2−، وأنها يمكن أن تُغيَّر بطرائق مدهشة. وفي ما يخصّ مناقشتنا للحَوْسَبة الكمّومية يُفضَّل عدم النظر إلى قيمتي التدويم على أنهما 1/2+ و1/2−، بل على أنهما القيمتان الاثنانيتان المألوفتان في الحاسوب، حيث تمثِّل القيمة 1/2+ الواحد، وتمثِّل القيمة 1/2− الصفر. وبافتراض أننا نستطيع التحكُّم في قيمة التدويم يمكننا اعتبار الإلكترون ممثِّلاً لأصغر وحدة من المعلومات الرقمية، وهي بت واحدة. لكنْ نظراً إلى أن الحواسيب الكمّومية تسلك سلوكاً مختلفاً قليلاً عن سلوك الحواسيب العادية، فلن نكون دقيقين بتسميتها بتاً. بل إن المصطلح المستعمل في الحَوْسَبة الكمّومية هو **كيوبت** *qubit*، وهو مصطلح يختلف عن وحدة القياس القديمة cubit (أي الذراع) التي استخدمها نوح أثناء بناء سفينته.

وفي حين أن مجرّد التمكُّن من تمثيل البت الواحد من المعلومات بالإلكترون هو إنجاز جيد، فإن قوانين الميكانيك الكمّومي تكشف عن بعض الإمكانات الأخرى للكيوبت. ولا يمكن لأي حسابات أن تتنبّأ بقيمة التدويم إلى أن تُقاس، وحينئذ تصبح تلك القيمة ثابتة. وحتى لحظة القياس، تتصرف الكيوبت كالـ 0 قليلاً وكالـ 1 قليلاً، ويمكن اعتبارها بسهولة على أنها كلاًّ من الـ 0 والـ 1 في الوقت نفسه، وهذا اضطراب في الشخصية يُسمّيه علماء الميكانيك الكمّومي تراكُب الحالتين 0 و1.

ما المثير في ذلك؟ صحيحٌ أن التدويم لا يتحدَّد إلا حين قياسه، إلا

أنك تستطيع تغييره باستعمال ضوء ذي تردّدات معيّنة. ويعمل الضوء الذي تستعمله، مع آلية جعله نبضياً ومستقطَباً، برنامجاً لحَوْسبتك الكمّومية. إلا أن حالة الكيوبت (1 أو 0) لا تتحدَّد أثناء عمل البرنامج، لأنك لا تكون قد قستها حتى الآن. لذا فإنه ينفِّذ في المحصِّلة أمراً معيّناً وكأنه يمتلك كلا القيمتين، مُجرياً عمليتين بالتوازي. ويمكن أيضاً ربط الكيوبتات معاً بحيث تؤثِّر حالة كيوبت معيّنة في حالة الأخريات. تُسمّى هذه السيرورة **التشابك** *entanglement*، وهي مفتاح جعل الحاسوب يعمل بأكثر من كيوبت واحدة.

تُعتبر المقدرة على تنفيذ برامج بالتوازي، مع تمثيل جميع النتائج الممكنة، مفتاحاً لعدد من المسائل اللافتة في علم الحاسوب. تقوم معظم تقانات التعمية cryptography، ومنها الخوارزميّتان RSA وDES اللتان تمثّلان أكثر خوارزميّات التعمية استعمالاً في الإنترنت، على فكرة أن تحليل الأعداد الكبيرة إلى عوامل أولية شديد الصعوبة. فالحاسوب الشائع، مهما كان كبيراً وسريعاً، يمكن أن يستغرق وقتاً أطول من عمر الكون الذي ابتدأ عند الانفجار الأعظم لكسر تعمية تُجرى ببساطة بواسطة حاسوب شخصي. أما الحَوْسَبة الكمّومية فيمكن أن تغيِّر كل ذلك: بإجراء التحليل إلى عوامل أولية بالتوازي يمكن كسر تلك التعمية بسرعة وسهولة كبيرتين. وهذا مثال لعملية لم تجعلها الحَوْسَبة الكمّومية أسرع فحسب، بل جعلتها ممكنة أيضاً. وهو أيضاً سبب أن الحَوْسَبة الكمّومية تُعتبر بتلك الدرجة من الأهمية لأن التعمية مفتاح كل الأمن الرقمي (كما كانت دائماً). والبحث في قواعد البيانات هو خوارزمية أخرى يمكن أن تستفيد كثيراً أيضاً من الحَوْسَبة الكمّومية.

إلا أن ثمة صعوبات كبيرة تواجه صنع الحواسيب الكمّومية، ومعظم تلك الصعوبات يخصّ التشابك. فكلما كان عدد الإلكترونات المتشابكة أكبر كان احتمال تأثير الأشعة الكونية العابرة أو الظواهر الخارجية الأخرى في واحد من تلك الإلكترونات أكبر، وهذا ما يُطيح بحساباتك جميعاً. تُسمّى هذه الظاهرة **فكّ التماسك** *decoherence*. حالياً، ثمة حواسيب كمّومية تتعامل مع حفنة من الكيوبتات، إلا أنه يبدو من غير المرجَّح أن تكون الطرائق الحالية قادرة على بناء حواسيب بأكثر من 10 كيوبتات. فإضافة بت الندِّية parity bit، التي تستعملها الحواسيب الإلكترونية لتصحيح الأخطاء حين نقل البيانات عبر وسائط غير موثوقة، يمكن أن تزيد عدد الكيوبتات قليلاً. ونظراً

إلى أن هذه الحواسيب الكمّومية تعاني أيضاً فك التماسك بعد نحو 1000 عملية، فإن ثمة الكثير من العمل الذي يجب فعله. ومع ذلك فإن استعراض أن هذه الظاهرة قابلة للتطبيق من حيث المبدأ أمر مثير جداً، وإن كان ثمة الكثير مما يجب البحث فيه في هذا المجال.

أحد سُبل حلّ هذه المشكلات هو استعمال إلكترونات النقاط النانوية بدلاً من إلكترونات الذرّات المنفصلة لتكوين الكيوبتات. في هذه الطريقة تُستعمل أسلاك نانوية لوصل النقاط النانوية وتوفير التشابك. تُعطي هذه الطريقة حلاً جذاباً لمشكلة التحكُّم في التشابك من خلال استعمال توصيلات مادية، وهذا ما لا يمكن تحقيقه بسهولة بين ذرّتين. وهي أيضاً استعراض عظيم لقوة السلَّم النانوي: تتلاقى قابلية المادة الجَسِيمة، للتشكُّل في تجهيزات مادية، مع الخواصّ الكمّومية للإلكترون المنفرد بُغية تحقيق نوع جديد كلياً من الحواسيب.

استغلال الحاسوب الذي في داخلنا: الحَوْسَبة بالدنا

يُعدُّ جسم الإنسان من نواح عديدة حاسوباً عالي الكفاءة. وإحدى الطرائق التي يحمل بها البيانات ويُعالجها هي استعمال الدنا وكيميائه الحيوية. وتمثِّل محاولات استعمال تلك الطرائق والتقنيات في الحَوْسَبة العامة حالياً أكثر المجالات تحدِّياً في علم النانو.

يتّصف الدنا بمزايا عديدة تُغري باستعماله مكوِّناً حاسوبياً. فمن ناحية أولى تبدو كثافة البيانات التي يحملها ممتازة جداً. تتوضَّع «بتات» الدنا، أو أزواج الأساس (انظر مناقشة الدنا في الفصل 4)، على شريطي الدنا بتباعد يساوي ثلث النانومتر. هذا يعني وجود نحو 100 ميغابت (مليون من الوحدان والأصفار الرقمية) في الإنش، أو ما يزيد على تِرابت (تريليون من البتات) في الإنش المربّع. وهذه الكثافة وحدها تكفي لتستحوذ على انتباه مصنِّعي الأقراص الصلبة (تقل كثافات البيانات على الأقراص الصلبة الحالية عن ذلك كثيراً)، إلا أن الدنا يمكن أن يُرزم بكفاءة في الأبعاد الثلاثة، وهذا ما يجعل قدرته على خزن البيانات أعظم من ذلك بكثير. قد لا يكون استعمال الدنا مفيداً أبداً في تحقيق سرعات عالية، وفي تطبيقات النفاذ العشوائي المستعملة

في تِقانة الأقراص الصلبة الحالية، إلا أن إمكاناته في أرشفة البيانات (وهي وظيفة تنفَّذ حالياً باستعمال الأشرطة المغنطيسية) هي إمكانات هائلة.

والدنا الثنائي الأشرطة وفير في الطبيعة، وفيه يرتبط الشريطان بمتمِّميهما الطبيعيين (اللذين يحتويان على ترتيب معكوس تماماً لأزواج الأساس) في سيرورة تُسمّى **التهجين** *hybridization*. ويمثِّل الدنا المهجَّن اللَّولب أو الحَلَزون المألوف الذي يمثِّل صورة الدنا المعتادة. ويعني التهجين أن الدنا ينطوي على مقدرة ذاتية على تحمُّل الخلل، لأن كل بت من البيانات موجودة فعلاً على شريطين اثنين. يُسمّي مصنِّعو الأقراص الصلبة القرصَ المكافئ لذلك بالمرآة. لكنْ برغم هذه المزايا من الكثافة والوفرة ما زال معظم السيرورات الطبيعية التي تقرأ وتنسخ الدنا يحتوي على معدّلات أخطاء تزيد بألف مرّة عمّا هو موجود في آخر ما تُوصِّل إليه من وسائط الخزن المغنطيسية. ويُؤمل تجاوز هذه المشكلات ليصبح للدنا دور في الجيل القادم من وسائط خزن البيانات.

وثمة تطبيقات حَوْسَبة أخرى للدنا. فبتطبيق السيرورات الطبيعية التي يستعملها الجسم لقراءة وكتابة المعلومات الجينية تمكَّن العلماء من إجراء حسابات باستعمال الدنا. وعلى وجه الخصوص، جرى استعراض حاسوب متخصِّص (يُسمّى في علم الحاسوب «مُؤَتْمَتة منتهية finite automaton») يُستعمل فيه الدنا فعلاً.

قد يكون مثال المصعد في مبُنى مؤلف من طابقين أبسط مثال للمُؤَتْمَتة المنتهية. يكون المصعد في إحدى حالتين: في الطابق الأول أو الطابق الثاني، أو متنقلاً بينهما (وهي حالة عابرة). وأبسط من ذلك هو أن تتخيَّل مصعداً مكوَّناً من طابقين، مع أنه يمكن تعميم المسألة لتشتمل على أي عدد من الطوابق. يمكن للمصعد أن يقبل دخلين ممكنين: طلباً للصعود إلى الطابق الأول، وطلباً للصعود إلى الطابق الثاني. ويعرف المصعد ما عليه فعله في أي وقت بناء على حالته الحالية ودخله الحالي. على سبيل المثال، انظر في قواعد الانتقال المبيَّنة في الجدول 5 ـ 1.

تُسمّى هذه القواعد بقواعد الانتقال لأنها تحكم الانتقال من حالة إلى حالة. وإذا استطعت ترميز الحالات وقواعد الانتقال والدخل استطعت بناء حاسوب من هذا النوع. وإذا وُسِّعت هذه القواعد بقدر كاف وجدت استعمالاً

لها من قبيل تجزئة نص وإجراء تعرُّف للأشكال، وهذا تطبيق مفيد في كل شيء من التعمية حتى تعرُّف الكلام.

تعمل بعض حواسيب الدنا الحالية مستعملة إنزيمات بوصفها عتاداً (إنزيمات تسريع فصل ووصل جُزَيئات الدنا المألوفة للكيميائيين الحيويين)، وشريطاً مزدوجاً من الدنا بوصفه حاملاً لبياناتِ الدخل، وبضعة جُزَيئات دنا قصيرة بوصفها قواعد انتقال أو برنامجاً. ويحمل دنا الدخل رِماز الحالة الابتدائية (الطابق الذي يبدأ منه) على شكل سلسلة زوج أساس، ثم بيانات الدخل (الطابق المطلوب) بوصفها سلاسل زوج أساس إضافية مرتّبة. وبعد فك ترميز الحالة الابتدائية (في الطابق الأول مثلاً) تتابع المُؤَتْمَتة عملها بقص أو شطر الدنا بعد الحالة الابتدائية. وحين قص الدنا، تظهر نهاية لزِجة. ويعتمد تركيب النهاية اللزجة (الذي يحدِّد ما سوف ترتبط به) على السلسلة التالية لأزواج الأساس بعد موقع القص الذي يمثِّل تعليمة الدخل التالية (طلب الطابق الثاني). وفي تجهيزتنا يستطيع جُزَيء واحد من جُزَيئات البرنامج الممكنة الالتصاقَ بالنهاية اللزجة (في هذا المثال يمثِّل جُزَيء البرنامج ذاك قاعدةَ الانتقال: اذهب إلى الطابق الثاني). ويمتلك كل من جُزَيئات البرنامج تلك طولاً مختلفاً عن أطوال الجُزَيئات الأخرى. وفي المرة التالية التي يُشطر فيها الدنا يحدِّد طول جُزَيء البرنامج موقع القص ومن ثمَّ النهاية اللزجة التي تظهر مجدداً. بهذه الطريقة يجري التحكُّم في الحالة، وتستمر دورة «قص الدخل الأخير والالتصاق بجُزَيء برنامج» حتى استهلاك كامل الدخل، أو تُقصُّ سلسلة إنهاء خاصة، وهذا ما يولِّد جُزَيء خَرْج سهل الكشف يمثِّل الحالة الانتهائية للآلة.

الجدول 5 ـ 1

قواعد الانتقال

الحالة	الدخل	ما يجب فعله
في الطابق الأول	طلب صعود إلى الطابق الأول	لا شيء: ابق ساكناً
في الطابق الأول	طلب صعود إلى الطابق الثاني	اذهب إلى الطابق الثاني
في الطابق الثاني	طلب نزول إلى الطابق الأول	اذهب إلى الطابق الأول
في الطابق الثاني	طلب صعود إلى الطابق الثاني	لا شيء: ابق ساكناً

عملت حواسيب الدنا التجريبية تلك بسرعات من رتبة مليار انتقال في الثانية بمعدل خطأ يقل عن 0.2 بالمئة. وهذه سرعة مبهرة تضاهي سرعة بعض الحواسيب الشخصية، إلا أن معدل الخطأ أعلى كثيراً منه في الحواسيب الإلكترونية. ومع ذلك يمتاز حاسوب الدنا هذا ببضع مزايا مقارنة بالحواسيب الإلكترونية. فعملياته تستهلك جزءاً من عشرة مليارات جزء من الواط فقط، في حين أن المعالِج الإلكتروني يستهلك عشرات الواطات. لقد كان استهلاك المعالِجات الإلكترونية لهذا القدر الكبير من الطاقة دائماً عقبة في وجه تطويرها، لأن الطاقة تتبدّد على شكل حرارة تسخِّن المعالِجات مؤدّية إلى إتلافها. ويبدو أن هذا لن يحصل مع الدنا.

إن انخفاض استهلاك الطاقة أمر حسن، إلا أن الميزة المذهلة للمعالجة في السلَّم النانوي (أكانت حَوْسَبة كمّومية أو سِربية أو غيرها) هو أنها يمكن أن تُجرى بالتوازي. بعد أن تصمِّم برنامجاً بصيغة الدنا، تستطيع مزج ما تشاء من الدخول مهما كان عددها وتُعالجها في الوقت نفسه. وقد تضمّنت التجارب الأولى تريليون عملية تُنفَّذ فعلاً بالتوازي، في حين أن أكبر الحواسيب الفائقة لا يحتوي إلاّ على بضع مئات من المعالِجات، وهو بالتأكيد أكبر كثيراً من أن يوضع في أنبوب الاختبار الذي توضع فيه حواسيب الدنا.

وعلى غرار الحَوْسَبة الكمّومية، قد تبقى تطبيقات الحَوْسَبة بالدنا حَوْسَبة متخصِّصة، إلا أن تطبيقاتها العملية يمكن أن تظهر في وقت أبكر. فتقنيات تركيب الدنا لصنع سلاسل اعتباطية أصبحت أبسط، ويمكن الآن طلب دنا ذي خواص يحدِّدها الزبون بتكلفة معقولة بالفعل. وحينما تُصبح هذه الحَوْسَبة أسرع وأرخص مما هي عليه الآن سوف يصبح مفتاح طاقة المعالجة المتوازية الواسعة النطاق في متناول اليد.

المغانِط

إن كريس مورّاي Chris Murray هو عالم نانو شاب مبتكِر ناجح يعمل لدى مخابر واتسون التابعة للشركة IBM في نيويورك. ونظراً إلى وجود IBM مدة طويلة في طليعة شركات الحَوْسَبة وخزن البيانات فإنه من غير المستغرب أن يكون كريس واحداً من قادة العالم في مجال الخزن المغنطيسي الفائق الكثافة. وقد أدّى ظهور تِقانة الأقراص المغنطيسية، القائمة على خاصيّة هامة لبعض الموادّ المغنطيسية تُسمّى المقاومة المغنطيسية العملاقة giant magneto

resistance، إلى تخفيض أسعار الذاكرة الحاسوبية تخفيضاً هائلاً، وزاد كفاءة الحواسيب زيادة كبيرة. ويعمل مورّاي على دفع عناصر الخزن المغنطيسية تلك إلى أقصى حدٍّ لها في السلَّم النانوي.

يُحضِّر مورّاي في مخبره نقاطاً كمّومية منفصلة من موادّ مغنطيسية. وحينما تصبح تلك النقاط صغيرة جداً لا تستطيع الحفاظ على خواصّها المغنطيسية لأن الطاقة الحرارية تقضي على البصمة المغنطيسية. لذا صبّ مورّاي اهتمامه على تحضير نقاط صغيرة بقدر يكفي لحفاظها على مغنطيسيتها (العبارة التقنية «إبقائها فوق حد مغنطيسيتها المؤقتة paramagnetic limit»)، ولذا تحتفظ بذاكرة الحقل المغنطيسي الذي يكتبها. إن عمل مورّاي في تحضير وتثبيت وقياس وفهم تلك النقاط الكمّومية هو مثال للعمل بالبُنى المغنطيسية في السلَّم النانوي. ثمة مناقشة للبُنى النانوية المغنطيسية في الفصل التاسع.

التصنيع

يعيش مارك ريد Mark Reed في ريف كونِّكتيكات، وهو ذو بسمة مغنطيسية الجاذبية، وضحكة حاضرة، إضافة إلى أنه رائد في علم النانو من أوجهٍ عدّة. وحينما كان لدى الشركة Texas Instruments كان واحداً من أولئك الذي أنشأوا دارات النقاط الكمّومية. ويُعلِّم الآن الهندسة الكهربائية في جامعة يال، حيث كان طليعياً في بناء الدارات الجُزَيئية الإلكترونية. وهو يستعمل عدداً من التقنيات، منها الطباعة بالحُزمة الإلكترونية، والتجميع الجُزَيئي الذاتي، والقياسات بمِجسَّات المسح، وذلك لبناء بُنى نانوية وقياس خواصّها. فالدراسة والتحسين المستمران لتقنيات التصنيع النانوي على درجة كبيرة من الأهمية للعلم والتِقانة النانويين، لأن البُنية التي لا يمكن صنعها محدودة الفائدة جداً. وقد كان عمل ريد محورياً لكامل مجال الإلكترونيات الجُزَيئية، وكانت له إنجازات تطبيقية أخرى أيضاً. وقد رأينا سابقاً بُنى جرى تكوينها باستعمال الطباعة النانوية بالقلم الغاطس (الكتابة النانوية على الجدران) وتقنيات المِجَسِّ الماسح (المِعداد). ويعمل مصنِّعو النانو على صنع بُنى أكثر تعقيداً بسرعة أكبر وكفاءة أعلى.

ونظراً إلى أن التصنيع النانوي بهذه الأهمية فإن معظم مراكز علم النانو مكتظة بالباحثين الذين يقومون بالتصنيع النانوي. على سبيل المثال، يضمّ مركز نورثوِسترن جو هبّ وريك فان دوين وسام ستَبّ وتشاد ميركين ومايك فازيلوِسكي (الذين زرناهم جميعاً في جولتنا)، إضافة إلى تِري أودوم Teri

Odom، أحدث أعضاء الكلِّية. وقد عملت تِري مع رائدي علم النانو تشارلز ليبر وجورج وايتسايدس، وهي تقوم بالتصنيع النانوي (مثل ريد) باستعمال موادّ صلبة (معادن وأنابيب نانوية وأنصاف نواقل) وطرية (جُزَيئات).

إن التصنيع هو موضوع شائع في البُنى النانوية، وسوف يظهر في جميع فصول هذا الكتاب القادمة.

الإلكترونيّات

يعمل مارك هِرسام Mark Hersam في قسم علم الموادّ في جامعة نورثوِسترن. وهو عضو حديث في الكلية بدأ حياته العملية قبل سنتين فقط، ومع ذلك لا ينفك يُحرِزُ مزيداً من الشهرة لنفسه في كل وقت يستطيع فيه الابتعاد عن ملعب الغولف. فمنذ ابتداء عمله في الدكتوراه في جامعة إلّنوي مع جو ليدينغ Joe Lyding، كان المطوِّر الرئيسي لطرائق جديدة لتحضير وقياس بُنى نانوية ذات خواصّ إلكترونية واعدة هامة واستثنائية.

كرَّس هِرسام عمله لموضوع الإلكترونيات الجُزَيئيَّة، أي الخواص الإلكترونية للجُزَيئات المختلفة. في الدارات العادية، يمكن إجراء القياسات بواسطة مقياس جهد أو تيار أو راسم إشارة، لكن من المستحيل وضع زوج من ملاقط رأس التمساح على طرفي جُزَيء منفصل. هذا يعني أن إجراء قياس، شديد البساطة في سُلَّم المقاسات الكبيرة، يمكن أن يكون شديد التعقيد في السلَّم النانوي. لكن هِرسام يقارب المشكلة بتحضير بلّورة أُحادية من السليكون، أحد وجهيها مَطليّ بذرّات هدروجين. ثم يستخدم مِجْهَر المسح النفقي لانتزاع ذرّة هدروجين واحدة ووضع جُزَيء من البخار المحيط في مكانها. فيرتبط الجزيء الجديد بالمكان الذي خرجت منه ذرّة الهدروجين، وتبدو البُنية الآن كمستوٍ مسطّح من ذرّات الهدروجين مع جُزَيء وحيد متوضِّع في الوسط. يُسمّى هذا التوضيع الدقيق لجزيء واحد **الطباعة ذات التغذية الراجعة المتحكَّم فيها** *controlled feedback lithography*. وبعد وضع جُزَيء منفرد على السليكون يستطيع هِرسام استعمال طرائق المجسّ الماسح لقياس التيار الذي يمر عبر ذلك الجزيء، إضافة إلى الحركات التي يقوم بها وكيفية تأثير التيار المار عبره أثناء حركته. وأثناء قيامه بهذه القياسات يحافظ السليكون على الجزيء في مكانه.

تُعتبر فكرة عبور التيار لجزيء منفرد واحدة من الأفكار التأسيسية للإلكترونيات الجُزَيئية، وهي من أكثر أجزاء إلكترونيات السلَّم النانوي أهمية،

التي سوف نراها ثانية في الفصل التاسع. وعلى وجه العموم، يُعتبر استعمال البُنى النانوية في الإلكترونيات واحداً من أكثر أوجه علم النانو تحدّياً وإثارة. وبالفعل، يعتمد نقل الشِحنة في المستوى الجُزَيئي أو النانوي على مجموع كاملة من المفاهيم الجديدة التي تتحدّى فهمنا للإلكترونيات.

الإلكترونيّات مرّة أخرى

لقد كانت مخابر بل/لوسنت تكنولوجيس Bell Labs/Lucent Technologies أكثر المخابر الصناعية نجاحاً في التاريخ. فقد اخترع أعضاؤها الليزر والترانزستور، وكانت إسهاماتها في التِقانة والفيزياء الحديثة بجميع أوجهها تقريباً مدهشة واستثنائية. وقد نفَّذت زينان باو Zhenan Bao مشروع تخرُّجها في جامعة شيكاغو، وعملت طوال حياتها المهنية لدى مخابر بل. وهي امرأة شابة استثنائية المهارة والجاذبية والإبداع.

تخصَّصت زينان بالكيمياء العضوية من خلال التدريب، وتركَّز عملها لدى مخابر بل في تطبيقات الجُزَيئات العضوية في العلم والتِقانة النانويين. وقد كان دورها محورياً في ابتكارات هائلة لدى مخابر بل. وبالتعاون مع زملاء لها، منهم هوارد كاتس Howard Katz وأنانث دودابالابور Ananth Dodabalapur، بنت مجموعة من التجهيزات القائمة على الجُزَيئات العضوية التي استعملتها لتنفيذ أنواع من المهام ذات صلة بتِقانة السليكون عموماً. ومن إنجازاتها الرئيسية شرائح ترانزستورية عضوية رخيصة تُستعمل لصيقات تعريف للمنتجات والطرود البريدية. وهذا عمل يجعل ما تَعِدُ به الإلكترونيات الجُزَيئية أكثر من مجرد نسخة صغيرة من إلكترونيات عادية، أي يجعلها حقلاً الأشياءُ الجديدة كلياً فيه ممكنة.

النَّمْذَجة

إن جورج شاتس George Schatz هو أستاذ كيمياء في جامعة نورثوِسترن. نشأ بالقرب من ووترتاون في نيويورك حيث علَّمت أمه في مدرسة مؤلفة من غرفة واحدة(*)، وشارك في فرق رياضية متعددة حينما كان في المدرسة

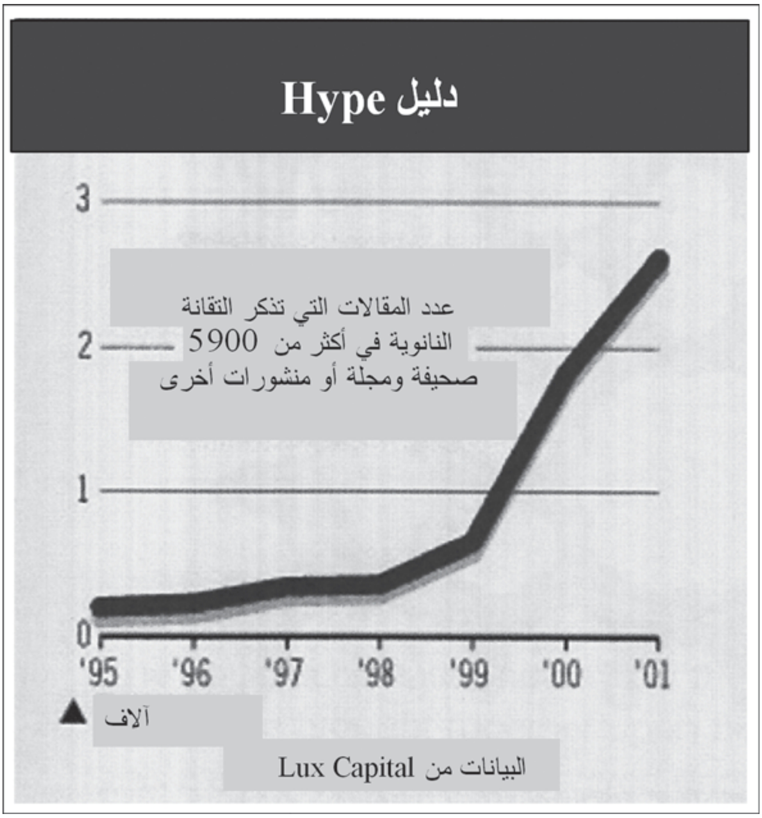
(*) one-room school. مدرسة تتألف من غرفة واحدة يجتمع فيها جميع الطلاب ويُعلِّم فيها معلِّم واحد الأساسيات لصبيان وبنات متعددي المستويات. كان هذا النوع من المدارس شائعاً في المناطق الريفية في كثير من البلدان منها الولايات المتحدة وكندا وأستراليا ونيوزيلندا وبريطانيا وإيرلندا وإسبانيا في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين. وهي ما زالت موجودة في بعض الدول النامية (المترجم).

الثانوية. وهو كيميائي نظري تدور معظم بحوثه حول سلوك الجُزَيئات المتفاعلة مع جُزَيئات أخرى أو مع السطوح.

وكان أحد أقوى مساعي شاتس البحثية الأخيرة بحث في مجال بصريات السلَّم النانوي. وعلى وجه التحديد، كان مهتماً بالتنبُّؤ بالكيفية التي تغِّير بها مقاسات الجسَيْمات النانوية وأشكالها ومحيطها خواصَّها البصرية، وهذه هي الظاهرة التي يقوم عليها تغيُّر لون زجاج النوافذ مع تغيُّر مقاسات جُزَيئات الذهب النانوية التي يحتوي عليها. وعمَّم شاتس نموذجاً لخواص الجسيمات النانوية البصرية كان قد اخترعه قبل قرن فيزيائي ألماني اسمه ماي Mie، وطوَّر برامج حاسوبية قوية جداً تبيِّن بدقة الكيفية التي تحدِّد بها حجوم الجسيمات النانوية وأشكالها وتراكيبها وبيئة مُذيبها وألوانها. وتمكِّن هذه النماذج من تفصيل البُنى النانوية بحيث تستجيب للون مُعيَّن من الضوء. إن هذه التقنية تنطوي على مضامين كبرى لتصميم واستعمال البُنى النانوية في مجالات من قبيل التقاط طاقة الضوء من الشمس، وتوليد الإشارات، والعمل كعوامل علاجية.

إن التحليل النظري والنَّمْذَجة جوهريان لفهم وتصميم البُنى النانوية، وللعلم برمّته عموماً. وإذا كان من الممكن تكوين نماذج عامة لتمثيل ظاهرة نانوية معيّنة، كان من الممكن تحديد البُنى النانوية التي تُبدي تلك الخصائص على نحو أقوى أو أكثر فائدة. فالنَّمْذَجة تمكِّننا من التحدُّث بثقة حينما نقول إن الأنابيب النانوية ليست أقوى مادة صُنعت حتى الآن فحسب، بل هي أيضاً أقوى مادة يرى فهمنا الحالي للعلم أنها ممكنة. وحينما تستطيعُ إجراء تصميم هندسي في المستوى الجُزَيئي ليس من المهم أن تفهم ما فعلته فحسب، بل ما تستطيع فعله أيضاً إن كان ثمة ما يمكن فعله، لأنه يمكن في الواقع صنع أي شيء مستقر تقريباً بواسطة تقنيات التصنيع المتقدمة تقدماً كافياً. لا يوجد فصلٌ محدَّد في هذا الكتاب مكرَّس للنمذجة، ومع ذلك تبقى بالغة الأهمية في جميع مجالات علم النانو لأنها توفِّر أساس التصميم والفهم.

إن مفاهيم وعلم وتِقانة النانو تنمو بسرعة مذهلة، وهذا ما يُريه الشكل 4,5 الذي يُبَيِّن عدد المقالات العلمية المنشورة سنوياً التي تستعمل العبارة «علم النانو». لاحظ أن العدد يرتفع من 0 قبل عشر سنوات حتى أكثر من 2500 مقالة سنوياً، وهو ينمو بمعدل مشابه لقانون مور. والجولة الكبرى المختصرة جداً في مواضيع التِقانة النانوية التي قمنا بها توحي بالإثارة والفوائد التي ينطوي عليها علم النانو. وقد حان الوقت الآن للغوص في بعض التفاصيل.



الشكل 5 ـ 4: دليل Hype **للتقانة النانوية**

اقتُبست بعد موافقة: *Lux Capital*.

6 ـ الموادّ الذكيّة

«سوف يؤدّي العلم والهندسة في السلَّم النانوي إلى فتوحات الغد التقانية الأساسية على الأرجح. فمقدرتنا على العمل في المستوى الجُزَيئي، ذرّة بذرّة، لتكوين شيء جديد نستطيع صنعه صعودياً تفتح مجالات واسعة للكثيرين منا . . . وهذه التِقانة يمكن أن تكون المفتاح الذي سوف يحوِّل حلم استقصاء الفضاء إلى حقيقة».

ديفيد سواين David Swain
نائب أول لرئيس الهندسة والتِقانة لدى شركة بوينغ.

■ البُنى ذاتيّة الالتئام 103
■ التعرُّف 105
■ الفصل 106
■ مُحفِّزات التفاعل 108
■ البُنى النانوية والمركَّبات المتباينة الخواص 110
■ التغليف 111
■ السلع الاستهلاكية 112

افترض أنه يمكن إيقاف سيرورات التأكُّل إيقافاً تاماً بحيث يمكن صيانة الجسور والسكك الحديدية بتكلفة تساوي كسراً من التكلفة الحالية. وافترض أنه يمكن احتواء موانع الاتساخ دائماً ضمن الملابس بحيث تنعدم الحاجة إلى الذهاب إلى دكان التنظيف حين انسكاب الشوربة عليها. وافترض أن زجاج السيارة لا يبتلّ أبداً ولا يتكوَّن الجليد عليه، وأن المطر لا يعيق الرؤية. وافترض أن بلاط الحمَّام وشراشف المشافي قد طُوِّرت لتكون ذاتية التنظيف وقاتلة للجراثيم والفيروسات التي تتوضّع عليها. وافترض أن نوافذ السيارة تستطيع معايرة عكسها لأشعة الشمس الساطعة تلقائياً بحيث تبقى السيارة الواقفة في مرآب بعد الظهر عند درجة حرارة مريحة. وافترض أن تمزُّق القماش أو انثقاب دولاب السيارة يمكن أن يكون ذاتي الإصلاح تلقائياً. كل تلك الأشياء ممكنة، وقد أصبح بعضها حقيقة واقعة نتيجة لاستعمال الموادّ الذكية.

ما يجعل المادة ذكية هو أنها تتضمّن في تصميمها مقدرة على تنفيذ مهامّ معيّنة متعددة. وفي التِقانة النانوية ويُجرى ذلك التصميم في المستوى الجُزَيئي. ويمكن للموادّ الذكية أن تكون سكونية أو متغيِّرة، أي إن بعضها يتصرف دائماً بالطريقة نفسها، ويستجيب بعضها الآخر لمؤثِّرات خارجية ويغيِّر خواصّه تبعاً لها. على سبيل المثال، يُعتبر التفلون مادة ذكية لأنه مصمَّم من حيث المبدأ ليكون عديم الالتصاق. وهو مادة ذكية سكونية لأنه مصمَّم بحيث لا يستجيب لقوى خارجية. أما طائرات الشبح المقاتلة التي لا يراها الرادار فتُطلى بموادّ بوليمرية ذكية تغيِّر لونها وبصمتها الكهرمغنطيسية استجابة للظروف الخارجية ولتعليمات الطيَّار، محقِّقة بذلك أكبر مقدار ممكن من التمويه. إن تصميم الموادّ الذكية يمثِّل تحدياً تقانياً كبيراً، وفرصة اقتصادية كبرى للتِقانة النانوية.

إن جميع الموادّ الحيوية هي موادّ ذكية تقريباً. والمثال البارز هو جلد الإنسان. فالجلد نَفوذ لبعض الموادّ من قبيل الماء والشوارد المتفكِّكة. وهو يعمل مُحِسّا للحرارة واللمس والصوت. وهو ذاتي التجدُّد، ويعمل عائقاً للهواء الخارجي وللسوائل الحيوية الداخلِيّة. وهو مادة ذكية متغيرة متعددة المكوّنات، ويتصف ببعض الخواص التي تحاول التِقانة النانوية تصميمها وتضمينها في البُنى التركيبية.

ليست الموادّ الذكية ظاهرة نانوية بالضرورة. فالقُدُور المصنوعة من التفلون تُصمَّم في سُلَّم المقاسات الكبيرة، ومثلها طِلاءات القوارب المانعة لتكوُّن

الفطريات والحشائش. لكن المقدرة المتوفرة في التصميم النانوي توفر موادّ أكثر غنى وذكاء مما يمكن تحقيقه بالمكوِّنات الكبيرة المقاس. وقابلية العمل في السلَّم النانوي، «أي المستوى النهائي من الصغر»، تمكِّننا من تكوين موادّ تستطيع نقل الخواص الجُزَيئية، وخواص سلَّم الأشياء الكبيرة للموادّ الجَسِيمة، وحتى السيرورات الحيوية في بناء الموادّ الذكية. ومن الواضح أن الموادّ الذكية تضم مجالاً واسعاً جداً من البُنى والأنشطة، وكثير منها أصبح موضع اهتمام هائل. دعنا ننظر إلى بعض منها.

البُنى ذاتيّة الالتئام

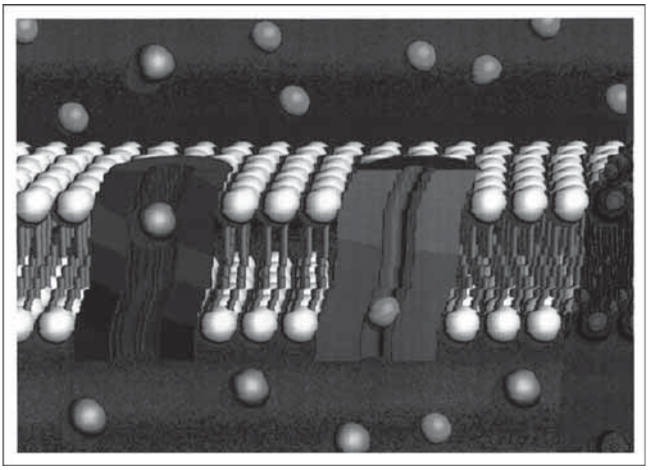
حينما نفكِّر في الالتئام فإن أول ما يخطر على بالنا هو الالتئام الذاتي لجروح الجلد وكدماته. فحينما يتمزق وعاء دموي تتجمَّع صُفيْحات الدم وتُكوِّن خثرة توقف النزف. ثم تستمر سيرورة الالتئام إلى أن يشفى الوعاء الدموي تماماً. إنها عملية شديدة التعقيد تتضمن عدة مكوِّنات دموية مع نمو للخلايا، إلا أنه يمكن تبسيطها وتطبيقها على البُنى الصنعية.

تستجيب أبسط البُنى ذاتية الالتئام للتمزُّقات المحلّية الحاصلة في نسيج مستمر، وذلك بإصلاحها. وإطارات السيارات ذاتية الالتئام هي مثال مألوف يتكوَّن فيه بوليمر جديد لسدّ ثقب في بُنية الإطار البوليمرية الأصلية. ومن الواضح أن هذا الإصلاح يحصل لثقوب في سُلَّم الأشياء الكبيرة، لا السلَّم النانوي. إلا أن المبدأ يبقى هو نفسه.

وأكثر مثال شيوعاً للبُنى ذاتية الالتئام هو زيت القلي في المِقلاة. يُبعِد زلق ملعقة خشبية على قاع المقلاة الزيت مؤقتاً عن المكان الذي تنزلق عليه. إلا أن الشريط الخالي من الزيت لا يدوم طويلاً، لأن تلاصق الجُزَيئات ضمن الغشاء معاً يجعل الزيت يتدفق ليجتمع ثانية ويغطي الشريط بالزيت من دون أن يترك أي أثر للملعقة.

أما المثال الحقيقي للالتئام الذاتي في السلَّم النانوي فهو ما يحصل في الأغشية الحيوية العادية. تترابط تلك الأغشية معاً، في أبسط صورها، بواسطة جُزَيئات لها شكل البالونات مع سلاسل طويلة ملتفة حولها. ويكون جزء البالون النانوي المنتفخ في الجُزَيء إما مشحوناً أو مستقطباً جداً، ولذا ينحل في الماء. أما السلسلة النانوية الطويلة فتكون غير مشحونة وغير مستقطبة، ولذا لا تنحلّ

في الماء. يُري الشكل 6 ـ 1 رسماً توضيحياً لهذه البُنية. ونظراً إلى أن مجموعات الرأس المستقطبة (البالونات) تنحل في الماء فإنها تنزع نحو التجمُّع معاً. وعلى غرارها تتجمَّع السلاسل الشحمية غير المستقطبة معاً لأن تجاذبها الكيميائي معاً أقوى من تجاذبها مع الماء. والنتيجة هي أن أبسط صورة للغشاء الحيوي تتضمن مجموعات رأس مستقطبة أليفة للماء متدلية نحو البُنية المائية، ومجموعات ذيل هدروكربونية نفورة من الماء في وسط الغشاء. وتختلف سماكة الغشاء عموماً من 1 حتى 20 نانومتراً.



الشكل 6 ـ 1: نموذج حاسوبي لجزء من غشاء خلية. البالونات الفاتحة أليفة للماء، والشرائط الغامقة نفورة من الماء. والبنى الأسطوانية هي قنوات لنقل الشوارد عبر الغشاء

اقتُبست بعد موافقة الناشر من: *General Chemistry, 8/e, by Petrucci/Howard, ©Pearson Education, Inc.*.

وإذا فُتح ثُقب في هذا الغشاء هرعت الجُزَيئات التي لها شكل البالون فوراً لملئه. فالغشاء الحيوي يُصلح نفسه حتى لو كان الثقب كبيراً جداً، ما لم يكن الثقب محتلاً بجسم آخر (تتوضَّع أحياناً بُنى نانوية على سطح الغشاء وتمنع إصلاحه، ومن تلك البُنى قنوات الشوارد التي تسمح للشوارد بدخول الخلِيّة وجهاز التركيب الضوئي). يكمن جزء من سر الاستقرار اللافت الذي تتصف به أغشية الخلايا في أنها ذاتية الإصلاح في السلَّم النانوي. ويمكن هندسة خواصّ الالتئام الذاتي في موادّ متنوعة، وهي تشهد الآن استعمالاً في اللدائن الهندسية.

التعرُّف

من سِمات المادة الذكيّة أنها تستجيب للمؤثر ضمن ظروف معيّنة. ومن تلك السمات أيضاً أنها تسمح بفصل الموادّ التي تُعرَّض المادة لها. ويمكن للموادّ أن تكون ذكية أيضاً من حيث مقدرتها على التعرُّف الجُزَيئي التي تمكِّنها من الاستجابة لمحفِّزات أو اضطرابات كيميائية أو كهرمغنطيسية معيّنة.

لقد ذكرنا تنمية الأنابيب والأسلاك النانوية من بلّورة أُحادية في الفصل الرابع. وهذه مسألة تَعرُّفٍ، فمكوِّنات السلك النانوي المختلفة تتعرَّف أولاً بذرّة البلّورة التي توضع في وسطها، ثم يتعرَّف كل منها الآخر. بهذه الطريقة يتوسَّع السلك النانوي الصلب ضمن المحلول المغطَّس فيه تماماً بنفس طريقة توسُّع المتدلِّيات الجليدية التي يتجمد الماء عليها من الخارج، أو طريقة توسُّع بلّورات الملح ضمن محلول ملحّي مشبع، أو طريقة تَبَلْور سكّر النبات في محلول سكري. وإحدى الطرائق المبتكرة المتبعة في عدة مخابر (منها مخبر تشارلز ليبر في جامعة هارفارد ومخبر بايدونغ يانغ Peidong Yang في بركلي) تستعمل بذور بلّورات تجعل البُنى المنمّاة تختار الشكل الخاص بالسلك الطويل الرفيع (الشكل 4 ـ 7)، بدلاً من أشكال اللَّبِنات الشائعة المميِّزة للبُنى البلورية. وهذا مثال لاستعمال التعرُّف الجُزَيئي في تكوين بُنى نانوية معيّنة. وهو مثال أيضاً لتنمية البلّورات أو الألياف المألوفة، لكن بعد دفعها إلى أقصى حدّ من الصغر.

وثمة مثال آخر موجود في الخلِيّة الحيوية. لقد ناقشنا قبل قليل الأغشية ثنائية الطبقات، ذات الخارج الأليف للماء والداخل النفور من الماء، والتي تغلِّف الخلايا الحيوية. وبُغية تمرير شيء عبر الغشاء، ثمة القنوات التي ليست في المحصّلة إلا أنابيب ممتلئة بالماء. وهذه الأنابيب ذات مقاطع نانوية المقاس، وتسمح للمغذّيات والفضلات والمكوِّنات الهامة الأخرى بالحركة بين الخلِيّة ومحيطها. وقد استخدم رِزا غَديري Reza Ghadiri ومجموعته في معهد سكريبّس Scripps بُنى ذاتية التجميع مكوَّنة من جُزَيئات لها شكل الحلقة تُسمّى ببتيدات دورية صغيرة لبناء قنوات صنعية. تتكدَّس تلك الببتيدات الصغيرة بعضا فوق بعض لتكوِّن قناة صنعية تبدو ككدسة نانوية من إطارات السيارات. يمكن إدخال هذه القنوات الصنعية في غشاء الخلِيّة كي تجعل الأشياء تتسرّب داخلة إلى الخلِيّة وخارجة منها بسرعة كبيرة. ومن الممكن تخيُّل بعض التطبيقات الطبية لهذا النوع من الموادّ الذكية ذاتية التجميع التي تؤدّي إلى موت خلايا السرطان.

تعمل القنوات الطبيعية، والقنوات الصنعية التي صنعها غديري ومجموعته، بالتعرُّف الجُزَيئي في مجالين مختلفين: تتعرَّف مكوِّنات القناة بعضها بعضاً، وتتعرَّف القناة المجمَّعة المحيط الخارجي لغشائها ثنائي الطبقات بحيث تستطيع حشر نفسها فيه. ويمكن لضمّ التعرُّف إلى التجميع الجُزَيئي أن يُنتج موادّ ذكية في مستويات كثيرة ليست ممكنة إلا في السلَّم النانوي.

الفصل

يُعدُّ فصل مكوِّنات مزيج مؤلّف من جُزَيئات أو موادّ أخرى بعضاً عن بعض سيرورة هامة في المنظومات الحيوية وفي الصناعات الكيميائية والغذائية والصيدلانية ومعالجة الفضلات. وفي الطبيعة، يمثِّل التفاعل الانتقائي طريقة للفصل شائعة جداً. فحينما يُهضم الطعام في جسم الإنسان يفصل الجهاز الهضمي السكريات ذات القيمة الغذائية عن الطعام الخالي منها. وفي الصناعة يُجرى الفصل عادة بطريقة فيزيائية تسمح لمكوِّن مُعيَّن بالانفصال مباشرة عن غيره كما يحصل في أبراج التقطير في مصافي النفط.

يمكن لتطبيقات البُنى النانوية المستعملة في عمليات الفصل أن تكون بسيطة كبساطة السلُّوفان (صفائح لدائن شفافة) المستعمل في التغليف الذي يسمح للجُزَيئات الصغيرة بالمرور عبر مساماته النانوية المقاس ويمنع الجُزَيئات التي مقاساتها أكبر من ذلك. والشيء نفسه يحصل في غسيل الكُلى، وهي عملية هامة لكنها شاقة على مرضى قصور الكلى يُغسل فيها دم مريض من الفضلات. في تِقانة غسيل الكلى الحالية، يجب ضخ الدم إلى خارج الجسم لترشيحه بواسطة آلة غسيل الكلى، ثم يُعاد ثانية إلى الجسم. وقد حصلت تطورات في تِقانة أغشية الترشيح، لكن تلك التِقانة ما زالت تمثِّل تحدّياً كبيراً للصناعة الكيميائية.

إن نسيج Gore-Tex هو مادة ذكية لها وظيفتان. فهي تسمح لبخار الماء بالخروج (لذا لا يشعر مرتدي الملابس المصنوعة منها بدبق العرق)، وتمنع الماء السائل من الدخول (فلا يبتلّ مرتديها). في هذه المادة تُثقب صفيحة بوليمرية بثقوب ضئيلة. وتُصنع الصفيحة من الكربون المفَلْور، على غرار التفلون. ومقاسات الثقوب نانوية تقريباً وتسمح لجُزَيئات البخار أو لمجموعات الجُزَيئات الصغيرة بالعبور، وتمنع السائل من ذلك.

تُستعمل البُنى النانوية في الفصل منذ عدة سنوات. وإحدى طرائق الفصل التي تستعملها تتضمّن التعرُّف الجُزيئي، وبناء موقع جُزيئي خاص يمكن أن يرتبط خاصةً بالهدف الجُزَيئي المرغوب فيه ضمن مزيج. على سبيل المثال، توجد في الجزيء الكبير المعروف بالاسم EDTA (إثيلين ثنائي أمين رباعي حمض الخل ethylenediaminetetraacetic acid) أربعة مواقع أكسجين حمضي وبخاصة على نهايات الأذرع المرنة. ويمكن استعمال هذا الجزيء لالتقاط شوارد معدنية مختلفة من محلول. وتعميم مفهوم إثيلين ثنائي أمين رباعي حمض الخل يتضمّن ما يُسمّى حامل الحديد siderophore، وهو جُزَيء مصمَّم خاصة لاستعمال أذرعه المرنة، ومرصَّع بأجناس مشحونة معيّنة تتضمّن شوارد النتروجين والكبريت والأكسجين لالتقاط الشوارد المعدنية المرغوب فيها.

تبدو حوامل الحديد (السيدروفورات) كالأخطبوط النانوي المقاس، وهي تتصرّف مثله. فأذرعها الجُزَيئية تشابه المِجسَّات وتعمل أجناسها المشحونة مثل كؤوس الحجامة لالتقاط الشوارد المعدنية. وقد طوَّرت مجموعة كِن رايموند Ken Raymond في جامعة كاليفورنيا ببركلي حوامل حديد لالتقاط شوارد معدنية معيّنة يمكن أن تكون سامّة. ويمكن استعمال هذه الطريقة لالتقاط وإزالة سموم من قبيل الزرنيخ أو حتى الرصاص من الجسم. لذا يمكن أن تكون حوامل الحديد ذات قيمة كبرى لأمان أماكن العمل ومعالجة المياه، فضلاً عن كونها بُنى نانوية جُزَيئية مصمَّمة جميلة الأشكال.

إن أكثر الطرائق العملية شيوعاً لفصل الأشياء هي تمريرها عبر ثقوب، كالمسحوق الذي يُغربل في غربال، ويمكن لكل من البوليمرات والبلّورات ذات الثقوب الصغيرة أن تؤدي المهمة جيداً. تُسمّى هذه الطريقة عادة بالترشيح البالغ النعومة ultrafiltration أو الترشيح النانوي nanofiltration، ويمكن أن تكون ذات قيمة اقتصادية هائلة. إن الشركة Air Products Corporation تجني معظم دخلها من استعمال طرائق كيميائية لفصل الأكسجين والنتروجين من الهواء، ومن ثَمَّ بيع هذين الغازين النقيّين للاستعمالات الصناعية والكيميائية والطبية. وثمة تطبيقات أخرى للترشيح النانوي تمتد من تنقية المياه حتى إزالة السموم من مجاري الفضلات. ويمكن تسهيل جميع هذه التطبيقات ببناء بُنى مسامية نانوية. وقد مثَّل تطوير هذه البُنى المسامية من قبل شركات صناعية رائدة مثل Dow Chemical Company تطبيقاً اقتصادياً ناجحاً للتِقانة النانوية.

مُحفِّزات التفاعل

إنّ المحفِّز هو شيء يجعل التفاعل الكيميائي يحصل بسرعة أكبر. وفي جسم الإنسان، تُعتبر الإنزيمات أكثر المحفِّزات شيوعاً، وهي جُزَيئات بروتينية تسرِّع بوجه خاص تفاعلات كيميائية معيّنة. على سبيل المثال، يسهِّل بروتين البتيالين ptyalin الموجود في اللُّعاب تفكُّك النشاء إلى سكّريات بسيطة، وهذا هو سبب أن طعم الخبز يُصبح حلواً إذا تركته في فمك بعض الوقت. وفي حقلَي الكيمياء التحضيرية التركيبية والهندسة الكيميائية يُعتبر التحفيز واحداً من الإنجازات الاقتصادية الكبرى لأنه يمكن أن يُستعمل في تطبيقات مثل تكرير النفط. ففي البدء بالنفط الخام، تُستعمل المحفِّزات لاستخلاص الغازولين ووقود الطائرات النفاثة وجُزَيئات الهدروكربونات المختلفة التي يمكن استعمالها لصنع اللدائن والكيميائيات البترولية.

وإحدى طرائق زيادة الفعالية الكيميائية هي الاستفادة من حقيقة أن تلك الفعالية تتعلق بمساحة السطح. إذا كانت للشيء مساحة سطح أكبر كانت ثمّة مواضع أكثر للعوامل الكيميائية الأخرى كي ترتبط معاً وتتفاعل وتؤثِّر في بعضها. ومع تقلُّص مقاس الجُسَيْم تزداد مساحة السطح إذا بقيت كتلة المادة الكلّية ثابتة، تماماً كما في حالة مكعّب الذهب المذكور في الفصل 2. لذا، ومع تقلُّص مقاسات الجسيْمات لتصبح في السلَّم النانوي، تكون للمادة أكبر مساحة سطح ممكنة، وتأخذ قابليتها للتفاعل قيمتها العظمى، وهذا هو الغرض من المحفِّز. تستعمل هذه الطريقة شركات من قبيل Nanomat التي تصنع موادّ ذات حُبيْبات نانوية للتطبيقات الصناعية.

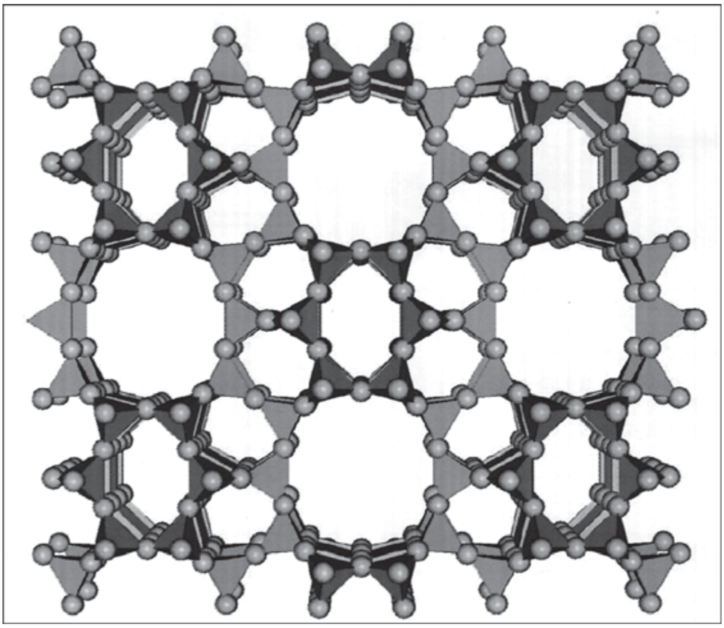
ويمكن للجسيْمات النانوية أن تُستعمل أحياناً محفِّزات نانوية، لكن هذا لا يمثِّل سوى الوصول بالتصغير إلى منتهاه بواسطة التِقانة الموجودة التي تستعمل المساحيق الشديدة النعومة محفِّزات. فالتِقانة النانوية توفِّر أيضاً بعض الفرص الجديدة كلياً، وبخاصة حين الجمع بينها وبين تقنيات الفصل. وعلى وجه الخصوص، وانطلاقاً من العمل الجاري لدى الشركة Mobil Corporation، كان ثمة اهتمام بالغ باستعمال بُنى تُسمّى الزيوليتات zeolites للتحفيز الموجَّه، لأنها تُنتِج بترولاً بكفاءة أكبر ويمكن استعمالها لانتقاء منتجات جُزَيئية معيّنة مرغوب فيها من المكوِّنات البترولية الواسعة الانتشار.

غالباً ما يُشار إلى الزيوليتات على أنها غرابيل جُزَيئية، لأن أشكالها تمكِّنها

من غربلة الموادّ. فهي حُجرات نانوية موصولة معاً بأنفاق أو مسامات نانوية محفورة في أكسيد صلب (انظر الشكل 6 ـ 2).

وفي التحفيز بالزيوليت، تكون جُسيْمات المحفِّز ضمن حُجرات الزيوليت. وقابلية التفاعل المتحكَّم فيها محلّياً بجسيْمات المحفِّز تلك، مع القيود الفيزيائية التي تفرضها مقاسات الحجرات والمسامات، تفضِّل هدروكربونات معيّنة لها شكل وتركيب محدّدان. وقد أدّت عملية سيرورة التحفيز المصمَّمة هذه، مقارنة بالتحفيز العشوائي الذي كان أكثر شيوعاً في الأجيال السابقة، إلى استعمالٍ للموادّ الخام أعلى كفاءة، وإلى فضلات وتكلفة أقل.

إن الزيوليتات شائعة جداً في الواقع. وهي تُستعمل غالباً مخفِّفات ماء منزلية، حيث تُسهِّل مبادلة شوارد الكالسيوم بشوارد الصوديوم وتقلِّل قساوة الماء. وثمة مئات من بُنى الزيوليت المختلفة، التركيبية والصنعية. وبُنية الزيوليت الخاصة المسامية النانوية هي سرّ مقدِرتها التحفيزية، وهي تمثِّل واحداً من أوائل تطبيقات التِقانة النانوية الواسعة النطاق والوفيرة الربح.



الشكل 6 ـ 2: نموذج كيميائي لبنية زيوليت معقدة
لاحظ المقاسات المختلفة للثقوب التي تمثِّل القنوات والحجرات

اقتُبست بعد موافقة: *Geoffrey Price, University of Tulsa*.

البُنى النانوية والمركَّبات المتباينة الخواصّ

تتّصف بعض البُنى النانوية بأنها متجانسة، ومن أمثلتها نقاط الذهب النانوية في الزجاج المشوب ونقاط ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوية في البطاريات. وثمة أيضاً كثير من البُنى والمركَّبات النانوية المتباينة الخواصّ. والمقصود بمتباينة الخواصّ في هذا المقام هو أن المادة ليست متماثلة من حيث خواصّها الفيزيائية في جميع أرجاء جسمها.

من الأمثلة البسيطة والجميلة على البُنى الأخيرة الجسيْماتُ النانوية ذات النواة والقَوقَعة. وقد صنع كثير من فرق العمل في العالم هذه البُنى لأغراض مختلفة، وهي تشابه عادة كُرات العِلْكة المكوَّنة من نواة داخلِيّة وقشرة خارجية رقيقة من مادة أخرى. وقد استعملت مجموعة تشاد ميركين نقاطاً نانوية ذات نواة من الفضة المطلية بالذهب في كشف الدنا، وكانت مجموعة مونغي باوندي Moungi Bawendi لدى معهد ماساشوستش للتِقانة MIT رائدة في دراسة جُسيْمات أنصاف النواقل النانوية ذات النواة والقوقعة.

ثمة فئة بسيطة جداً من البُنى النانوية المتباينة الخواص، منها موادّ إنشائية مقوّاة. خُذْ مثلاً الإسمنت المسلَّح المكوَّن من إسمنت عادي مصبوب حول هيكل من القضبان المعدنية. إذا استُعيض عن الإسمنت بمادة من اللدائن، وعن قضبان التقوية بأنابيب نانوية جاسئة قوية صلبة، كانت النتيجة مادة مركَّبة نانوية البُنية ذات مقاومة كبيرة جداً للكسر. وهي موادّ ذكية من حيث إنها مصمَّمة بنيوياً لتطبيق مُعيَّن، ومن المؤكَّد أن التِقانة النانوية سوف تُنتِج كثيراً منها بتنوُّع ومقاومة غير مسبوقين.

ثمة سوق هائلة لهذه الابتكارات. وتُنفق الشركتان بوينغ وإيرباص حالياً نحو 50 مليار دولار على طائرات الجيل القادم، أي الجامبو العملاقة A380 super jumbo ذات الـ 550 مقعداً، والسونيك كروزر Sonic Cruiser ذات السرعة القريبة من سرعة الصوت. وتُستعمل في كلتا الطائرتين موادّ ألياف كربونية بكثافة لجعل الطائرة خفيفة وقوية. إن ألياف الكربون مادة جيدة، إلا أنها لا تحقِّق الخواصّ الهندسية الموجودة في الموادّ المركَّبة النانوية. فالموادّ المركَّبة النانوية أقوى وذات عمر أطول كثيراً وتحتاج إلى موادّ أقل. وهي أخفّ أيضاً، وهذا ما يجعل الطيران أسرع واستهلاك الوقود أقل، ومن ثَمَّ التشغيل أرخص. صحيحٌ أنه سوف تكون لهندسة الطائرات تطبيقات في مجالات الاقتصاد

المختلفة إلا أنها صناعة ضخمة بذاتها ويمكن أن تربح مباشرة من الابتكارات في الموادّ الذكية.

ومع تعلُّمنا المزيد عن البُنى النانوية والتصنيع النانوي يصبح تحضير موادّ معقدة متعددة الخواصّ ممكناً. وفي حالة الطائرات قد يكون من المثير الجمع ما بين الالتئام الذاتي والخواص الفيزيائية للموادّ المركَّبة النانوية. فهذه التشكيلة قد تمكِّن من الإصلاح الذاتي لتلف في خزّان الوقود من النوع الذي أسقط طائرة الكونكورد أثناء رحلة الخطوط الجوية الفرنسية رقم 4590، أو حتى الذي فجَّر مكّوك الفضاء تشالنجر Challenger. ومن وجهة نظر شخصية تقريباً، من المفيد الجمع بين الفصل والتعرُّف والتحكُّم في البُنى الإلكترونية لصنع قماش منسوج أو ألياف ذكية مختلطة. يمكن لهذه النُسُج أن تغيِّر ألوانها حين تفعيلها ببطارية أو أن تغيِّر مساميّتها بعد تحسُّسها جُزَيئاً ما أو كشفها مستوى معيّناً من الحرارة أو الرطوبة. والقميص المصنوع من هذا القماش يمكن أن يتغيَّر من نسيج أصفر مفتوح القُطَب في يوم حارّ إلى صوفيّ دافئ أزرق اللون في المساء البارد. ويمكن لهذه الإمكانية أن تكون مفيدة جداً حتى في صنع السراويل الداخلِيّة، إلا أنه يجب صنعها من نفس المادة حينئذ، وهذا ما يجعل من المستحيل تقريباً تزيينها بموادّ أخرى.

التغليف

نظراً إلى إمكان صُنع بُنى جوفاء في السلَّم النانوي (من قبيل الزيوليت) فإنه من الممكن صنع موادّ نانوية مغلَّفة. وهذه الموادّ كثيرة الشيوع في البُنى الحيوية، فعلى سبيل المثال لا تكون الشوارد المعدنية التي من قبيل الزنك والنحاس معزولة عادة ضمن خلايا الجسم، بل تُحيط بها بروتينات صغيرة يُسمّى بعضها بالمدبِّرات chaperons. وقد بيَّنت مجموعة توم أوهالّوران Tom O'Halloran لدى جامعة نورثوِسترن بجلاء تام أن النحاس ينتقل عبر الخلِيّة من موقع إلى آخر محاطاً بمدبِّرات بروتينية صغيرة. وتلك المدبِّرات هي بُنى ذكية من حيث إنها تكشف وجود شاردة النحاس وتغلِّفها وتنقلها إلى مكان آخر حيث تسلِّمها. وهذه هي نفس السيرورة التي ناقشناها للسدروفورات (نواقل الحديد)، أي الأخطبوطات النانوية.

ومن الممكن أيضاً بناء بيوت زجاجية حول البُنى الصغيرة (رمي الحجارة ليس مشكلة في السلَّم النانوي). وبعض هذه البُنى هي إنزيمات مغلَّفة تُستعمل

فيها كُرات زجاجية نانوية فيها ثقوب لتغليف الإنزيم، فقد تكون للإنزيم وظيفة ما من قبيل الالتصاق بالأكسجين أو تحريك إلكترونات على بعض الأهداف الجُزَيئية. وبما أن الإنزيم مغلّف جزئياً بالزجاج، فإنه محميّ من هجمات كيميائية أو فيزيائية معيّنة. ونظراً إلى أنه يكون مكشوفاً جزئياً فإنه يبقى قادراً على متابعة أداء مهمته. إن مجموعة جو هبّ هي واحدة من عدة مجموعات عملت بكثافة بهذه البُنى الإنزيمية المغلَّفة.

وثمة تطبيق أشد ارتباطاً بالواقع عَمِل به ديفيد أفنير David Avnir ومجموعته في الجامعة العبرية في القدس، والشركة المستحدثة التي شارك في تأسيسها Sol Gel Technologies. فقد استعملوا تلك الكُرات الزجاجية النانوية، المُنتَجة بسيرورة تُسمّى تشكيل الزجاج بمحلول الهُلام sol-gel، لتغليف الزيت الواقي من الشمس. لا بد أنك قد زيَّتَّ جسمك يوماً قبل النزول إلى الشاطئ ولاحظت مدى إساءة ذلك الزيت لعينيك وثيابك وراحتك، وللقيمة الجمالية للمستحمِّين بالشمس عموماً. وبوضع المرهم ضمن بُنى زجاجية نانوية تمكَّن أفير من درء كثير من تلك الإحساسات الزيتية الشحمية. وأكثر من ذلك، لا تستطيع الجُزَيئات العضوية التي في الزجاج التفاعل كيميائياً مع الجسم. يمكن لهذا الفصل أن يكون هاماً لأن بعض الجُزَيئات الموجودة في الزيت الواقي العادي لا تحفِّز الاسمرار فقط، بل تستطيع أيضاً التفاعل كيميائياً مع الجلد وأن تسبب حكة واحمراراً. ومن الممكن لزيوت الوقاية من الشمس أن تكون مسرطِنة أيضاً. أما الزيوت المغلفة فتدرأ تلك المشاكل، موفِّرة مثالاً للموادّ الذكية التي يمكن أن تُستعمل على شاطئ البحر.

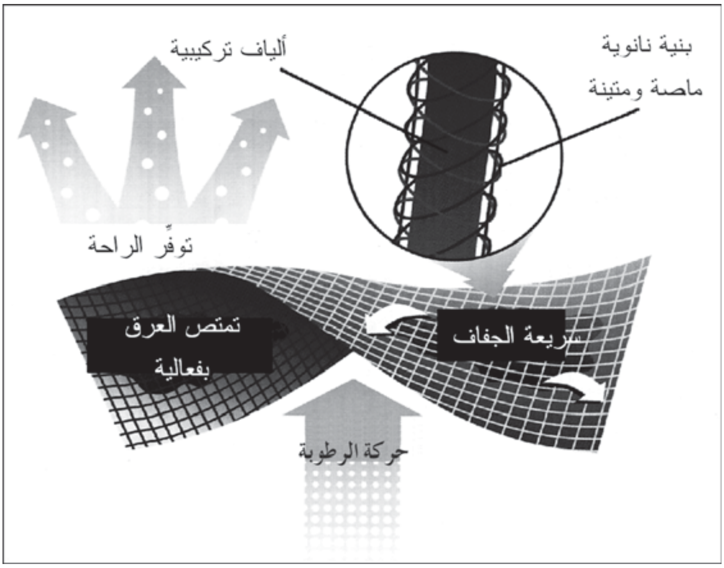
السلع الاستهلاكية

يتركَّز الجدل الدائر حول أهمية البُنى النانوية وعلم النانو في الإلكترونيات، وقد بدأنا به في الفصلين الأول والثاني. إلا أن المجتمع الحديث يعتمد أيضاً على السلع الاستهلاكية لجعل الحياة سهلة وسعيدة. وقد ذكرنا بالفعل القماش Gore-Tex الذي يُريح المسافرين بالتأكيد، والتفلون الذي يريح الطباخين. وثمة عشرات من الأمثلة الأخرى للموادّ الذكية المصمَّمة في السلَّم النانوي لتحسين حياة المستهلك.

وقد بدأت مناقشة المفعول المحتمل للتِقانة النانوية في ملابسنا فعلاً، وبضعة المنتجات الأولى التي من هذا النوع هي الآن قيد التسويق. وقد صنعت

بعضها شركة NanoTex التي تستعمل بُنى نانوية لتغيير الخواصّ الفيزيائية للملابس. تدّعي الشركة أن مُنتَجها المجفِّف النانوي NanoDry يجمع ما بين قوة الموادّ التركيبية التي من قبيل النايلون وبين راحة المنسوجات الطبيعية مفتوحة القُطَب التي تزيل العرق والرطوبة. وهي تفعل ذلك بلفّ ألياف داخلِيّة تركيبية قوية متينة بألياف ماصّة خاصة لتكوين ما يمكن أن يُسمّى مادة نانوية مركَّبة ذكية متباينة الخواص، مع أننا نرى أن تسميتها بالمجفِّف النانوي قد يكون أكثر إغراء (انظر الشكل 6 ـ 3).

لقد رأينا في هذا الفصل أيضاً بعضاً من الأمثلة الكثيرة التي تُري كيف أن التصميم في السلَّم النانوي يمكن أن يؤدي إلى منتجات محسَّنة في المجالات الطبية والفيزيائية والتجارية والاستهلاكية. يمكن للتصميم في السلَّم النانوي أن يعطي موادّ ذات خواص فيزيائية وكيميائية لافتة، وتستطيع الاستجابة على نحو متغيِّر للإجهادات المطبقة عليها، وتستطيع حمايتنا وحماية بيئتنا. وسوف يزداد عدد السمات التي يمكن أن يحتويها تصميم المادة يومياً بموازاة ازدياد معرفتنا بالبُنى النانوية.



الشكل 6 ـ 3: المجفِّف النانوي NanoDry.

اقتُبست بعد موافقة الشركة *Nano-Tex*.

7 ـ المُحِسَّات

■ المُحِسَّات النانوية الطبيعية 116

■ المُحِسَّات الكهرمغنطيسية 118

■ المُحِسَّات الحيوية 120

■ الأنوف الإلكترونية 124

تخيَّل عُلبة طعام في متجر تستطيع إعلامك فوراً إنْ كان الطعام الذي في داخلها قد تعرَّض للحرارة أو قد بدأ يفسد. وتخيَّل مؤشِّرا آلياً منيعاً يستطيع مراقبة المنزل باستمرار لكشف الكيميائيات الخطرة التي من قبيل غاز الميثان المتسرّب أو أُحادي أكسيد الكربون أو الأوزون. وتخيَّل تحليلاً للدم يُبيّن فوراً إنْ كان المريض مصاباً بجراثيم عقدية أو بالسكري أو بأمراض وراثية متنوعة أو بالانفلونزا أو بفقر الدم. وتخيَّل سلكاً بسيطاً يمكن حشره في الأرض ليُعلِم عامل الحديقة بأفضل تربة لزراعة الخِيار. وتخيَّل كاشف متفجرات آمن (يجب أن يكون آمناً) يعفيك من نزع ملابسك في المطار. إن كل هذه الإمكانات هي تطبيقات محتملة للمُحِسَّات النانوية. والمُحِسَّات هي بُنى تدلّ على وجود جُزَيئات معيّنة أو بُنى حيويّة، إضافة إلى تحديد مقاديرها. وهي منتشرة عملياً في مجتمعاتنا، وأفضلها سوف يُصنع من بُنى نانوية ليحدِّث معظم جوانب الرعاية الصحية وصناعات تعليب الأطعمة في المقام الأول.

إن المُحِسَّات أحدث مما قد تظن. وما يتذكره معظم الناس عن الكلمة sensor (أي مُحِسّ) يعود إلى مستر سبُك Mr. Spock في مسلسل **المسيرة النجمية** Star Trek والكلمة sensor ليست أقدم من ذلك. فقد استُعملت أول مرة في مقالة ظهرت في مجلة **نيو ساينتيست** New Scientist في عام 1958، ويعرِّفها معجم أكسفورد «بأنها تجهيزة تعطي إشارة حين كشفها أو قياسها خاصّية فيزيائية [أو كيميائية] تستجيب لها». في الواقع، لا يحتوي نص المعجم على العبارة [أو كيميائية]، لكن استعمال المُحِسَّات في كشف البُنى الجُزَيئية قد يكون أكثر مجالات التحسُّس أهمية وفائدة.

المُحِسَّات النانوية الطبيعية

على غرار كثير من مجالات العلم والتِقانة النانويين، فإن أمثلة مُحِسَّات السلَّم النانوي واسعة الانتشار في البُنى الحيوية. فالمُحِسَّات بالغة الأهمية في الاتصالات، والتواصل مع المتعضّيات الأخرى هو واحد من الخصائص المحورية للحياة. تظهر الإشارات بصِيَغ مختلفة منها الجُزَيئات والصوت والرائحة واللمس، ويمكن أن تظهر أيضاً بصيغ كهرمغنطيسية مثل الحرارة والضوء. والمقدرة على كشف هذه الإشارات مرغوب فيها، كما في حالة شم العطور، وضرورية، كما في حالة كشف الموادّ الكبريتية الكريهة الرائحة التي تُضاف إلى الغاز الطبيعي المورَّد إلى المنازل.

إن المُحِسَّات النانوية البالغة الحساسية الموجودة في أنوف بعض الحيوانات، وخصوصاً الكلاب، شديدة الأهمية لبقائها حية ولبعض الجوانب التي تساعد بها الناس. والآلية الجوهرية لحاسة الشم لدى الكلاب، أو الفرمونات البالغة الأهمية لدى معظم عالم الحشرات، هي التعرُّف الجُزَيئي. في التعرُّف الجُزَيئي، تميِّز أشكال الجُزَيئات المتمِّمة، الموجودة في بُنية حاسة الشم في أنف الكلب، أو في مستقبلات الجنس لدى الحشرات، أشكال جُزَيئات الإشارة، توزُّع بوجه خاص الشِحنة الكهربائية على سطوحها. وأبسط مثال على ذلك التَّام هو توافُق شكل المِفتاح مع شكل القُفل، إلا أن المفتاح في هذه الحالة يجب أن يكون له الشكل الصحيح والتوزُّع الصحيح أيضاً للشحنات الكهربائية على سطحه. من هذه الناحية، يمكن للأقفال ذات مفاتيح البطاقات المغنطيسية الشائعة في الفنادق أن تكون تمثيلاً أفضل للتعرُّف الجُزَيئي من حيث إنها لا تكتشف المفتاح فقط، بل تشعّ ضوءاً أخضر أيضاً لإعلامك بأنها كشفت المفتاح الصحيح (فتكون بذلك مُحِسَّات فعلية لأنها تكشف المفتاح وتعطي إشارة).

وإلى جانب التحسُّس الكيميائي، يعتمد عالَم الأحياء على مُحِسَّات لخواصّ أخرى. فكثير من الأزهار وأوراق النبات تنجذب نحو الشمس التي تمثِّل مصدر طاقتها. وتستجيب محسَّات جُزَيئية معيّنة في بُنية الورقة أو الزهرة لوجود الشمس، فتعطي إشارة إلى بُنية التحريك الجُزَيئية فيها للانتقال إلى اتجاه مُعيَّن تواجه فيه الشمس وتكتسب مزيداً من الطاقة منها. وسوف نقول المزيد عن ذلك في الفصل التاسع. ولدى الحيوانات آذان لتحسُّس الصوت، ويوجد لدى الأسماك خطوط جانبية لتحسُّس الصوت وتغيّرات الضغط. إن كل تلك الأشياء هي آليّات تحسُّس، وجميعها هامّ للحياة.

وسوف يثبُت أن المُحِسَّات التي في عالم النانو التركيبي على نفس الدرجة من الأهمية، وهي تقوم على نفس المبادئ كنظيراتها الطبيعية لا على تلك التي تقوم عليها أخواتها الصنعية الكبيرة الحالية. وتعمل المُحِسَّات في سُلَّم المقاسات الكبيرة عادة من خلال الخواص الفيزيائية للمادة الجَسِيمة، أو من خلال أجهزة ميكانيكية أو إلكترونية معقدة. على سبيل المثال، تعمل مقاييس درجة الحرارة بقياس التمدد الحراري للزئبق السائل، وتستعمل مقاييس التسارع منظومات إلكتروميكانيكية مكروية لقياس تسارع أو تباطؤ السيارات. وليست المنظومات الإلكتروميكانيكية المكروية، ولا التمدد الحراري، ظواهر سهلة لنقلها إلى السلَّم النانوي. لذا فإن المُحِسَّات النانوية سوف تحاكي غالباً تلك

السيرورات الحيوية التي تطوَّرت فعلاً في العالَم النانوي، أو تستعمل خواص مفتاحية من الميكانيك الكمّومي أو خواصّ فيزيائية تعتمد على المقاس ولا توجد إلا هناك. هذا يعني أن المُحِسَّات النانوية ليست أفضل وأدق المُحِسَّات الممكنة فحسب، بل إنها سوف تكون قادرة أيضاً على تحسُّس أشياء لم يكن من الممكن كشفها بمحسَّات سلَّم المقاسات الكبيرة.

يمكن تصنيف المُحِسَّات التركيبية وفقاً لما تتحسَّسه، ولذا سوف نناقش مُحِسَّات الإشعاع الكهرمغنطيسي، ومُحِسَّات الجُزَيئات الصغيرة والمتوسطة الحجم (المشابهة للمربّعات التي ناقشناها في الفصل الخامس)، ومحسَّات الكينونات الحيوية.

المُحِسَّات الكهرمغنطيسيّة

نقصد بالمصطلح «كهرمغنطيسي» في هذا الكتاب أيَّ صيغة للطاقة الكهربائية المغنطيسيّة تنتشر كالموجة. فانطلاقاً من الطاقة المنخفضة باتجاه الطاقات العالية نجد أمواج الراديو والأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي الممتد من اللون الأحمر حتى البنفسجي، والأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية. أما الصوت فهو من حيث الأساس موجة ضغط منتشرة، ولذا يختلف قليلاً عن الإشعاع الكهرمغنطيسي، إلا أنه يُتحسَّس بطريقة مشابهة.

يستجيب أبسط المُحِسَّات الكهرمغنطيسية لظرف فيزيائي، ومن أمثلتها الخلايا الكهرضوئية التي تُشعل الأنوار حين غروب الشمس. تقوم تلك الخلايا بقياس شدة الضوء القادم من الشمس، وحينما ينخفض سطوع ذلك الضوء عن مستوى محدَّد سابقاً تُعطي إشارة لتوصيل الكهرباء إلى المصباح.

لتطوير مُحِسٍّ ضوئي في السلَّم النانوي يمكن اقتفاء أثر البحث الجاري لتوليد الطاقة الشمسية. ولقد ناقشنا في الفصل الخامس تطوير خلايا ضوئية كهركيميائية من قبيل تلك التي طوَّرها مايكل غريتسل لالتقاط ضوء الشمس، حيث تنقل الجُزَيئات المثارة بضوء الشمس إلكتروناً إلى نقطة كمّومية نانوية في نصف ناقل من قبيل ثنائي أكسيد التيتانيوم. إن استعمال واحدة من تلك التجهيزات الكهرضوئية محساً للضوء أمر بسيط يبدأ بكشف أن الإلكترون قد نُقل إلى ثنائي أكسيد التيتانيوم، وهذا شيء سهل نسبياً لأن الإلكترون المنقول يمر عبر دارة خارجية لتخفيض طاقته بالاتحاد مع الشِحنة الموجبة التي تركها

في مكان انطلاقه. بكلمات أخرى، إذا ولَّدت الخلِيّة الضوئية كهرباء علمنا أنها قد سُلِّط ضوء عليها.

لعل أقدم مُحِسّات الضوء، وأكثرها بساطة وجودة بمعنى ما، هو مُحِسُّ الضوء النانوي الذي يقوم عليه علم وفن التصوير. في التصوير الضوئي القائم على الفضة المألوف تؤدي الفوتونات (أي طاقة الضوء) إلى تفاعل كيميائي بين شوارد الفضة الموجودة ضمن المادة المستحلبة الموجودة على سطح فيلم التصوير. وتتجمع شوارد الفضة معاً لتكوِّن مجموعات فضية نانوية (يتكوَّن أبسطها عادة من أربع ذرّات) تنمو لتصبح كبيرة بما يكفي لبعثرة الضوء والتقاطه، ولذا تبدو سوداء على السطح. مرة أخرى، إن تغيُّر الخواص مع المقاس، البالغ الأهمية للتِقانة النانوية، هو الفاعل هنا.

يتطلب صنع أفلام الأشعة السينية أو فوق البنفسجية أو تحت الحمراء سيرورات مشابهة جداً لتلك السيرورة (تُصنع تلك الأفلام غالباً لدى نفس الشركات التي تصنع أفلام التصوير). فالمطلوب ببساطة هو أن يتفاعل العامل الفعَّال ضوئياً، والذي ما زال على الأغلب هو الفضة، مع الضوء ذي طول الموجة الملائم. في حالة الأشعة السينية تكون أطوال موجات الضوء قصيرة جداً، وفي حالة الأشعة تحت الحمراء تكون أطول كثيراً. ولتوليف محسٍّ ضوئي يقوم على خلِيّة غريتسل كي يستجيب للألوان وأنواع الضوء المختلفة يكفي إيجاد جُزَيء اللون المناسب.

تتكوَّن المُحِسَّات الموجودة على سطح الفيلم من جُزَيئات أو ذرّات، وتنطوي سيرورة التحسُّس بواسطتها على تغيُّر غير عكوس في طريقة تجمُّع ذرّات الفضة. أما المكروفونات فتتحسَّس الصوت أو الضغط بطريقة مختلفة جداً. فهي تتألف من أغشية تهتز حين تعرّضها لأمواج ضغط أو صوت، وهذا هو نفس مبدأ رأس الطبلة التي يأخذ غشاؤها بالاهتزاز حين تعرّضه لضربات خارجية. وفي الواقع، تعمل الخلايا الوبرية في آذاننا بنفس الطريقة هذه أيضاً. يهتز غشاء الطبل في الأذن بسبب موجة الضغط الخارجية التي تمثِّل الصوت، ويؤدي الغشاء إلى توليد مجموعة شديدة التعقيد من الإشارات الكيميائية. إن الأذن مَحِسٌّ شديد التعقيد متعدد السلالم الترددية يقوم على الإشارات الجُزَيئية إلى حد بعيد، وتُحوَّل الطاقة فيه من طاقة اهتزاز في الغشاء إلى إشارات كهركيميائية تذهب إلى الدماغ.

ونظراً إلى أن معظم المُحِسَّات الكهرمغنطيسية مُصمَّمة أصلاً للتعامل مع موجات نانوية أو شبه نانوية فإن تصغيرها يبدو أقلّ تعقيداً من تصغير الأنواع الأخرى من المُحِسَّات. إنها تمثِّل جزءاً مثيراً من التِقانة النانوية، لكنها ليست بعظمة المُحِسَّات الحيوية الصنعية النانوية الجديدة كلياً.

المُحِسَّات الحيوية

ليست المُحِسَّات الحيوية مجرّد محسَّات طبيعية تمثِّل جزءاً من الحياة، بل هي محسَّات لكينونات حيوية منها البروتينات والعقاقير، وحتى فيروسات معيّنة. وفي الطبيعة طرائق متنوعة لكشف تلك الكينونات، وإحدى الطرق الشائعة هي تلك التي تقوم عليها الحساسية المألوفة. فحينما يتعرّض جسم الإنسان أولاً لمادة تثير الحساسية (وهي مادة لطيفة يظنها الجسم معادية)، يتأثَّر بها مولِّداً مضادّات جسمية تميِّز المادة المثيرة للحساسية إذا ظهرت ثانية. وتَستعمل المضادات الجسمية التعرُّف الجُزَيئي لتحديد البروتينات المحسِّسة وإطلاق الهيستامين histamine الذي يجعل جسمك يُبدي رد فعل على شكل عُطاس وحكّة وغثيان. إن هذه المقدرة على تحسُّس البُنى الكبيرة التي من قبيل البروتينات أو الحموض الأمينية على درجة بالغة الأهمية.

وكشف السكّر في الدم مشكلة قديمة في التحسُّس الحيوي. لا يستطيع مرضى السكري التحكُّم في مستوى الإنسولين في أجسامهم، ولذا يتفاوت مستوى سكر الدم لديهم تفاوتاً كبيراً. وإذا أصبحت تلك المستويات عالية جداً أو منخفضة جداً، شكَّلت تهديداً لحياتهم. حالياً، يجب على معظم المصابين بالنوع I من مرض السكري أن يسحبوا دماً من أجسامهم يومياً، أو حتى بمعدل أعلى، لتحديد مستوى السكر فيها. ويمكن تحسُّس جُزَيئات الغلوكوز بطرائق كثيرة، منها الضوئي والكهربائي والتعرُّف الجُزَيئي. لكنْ لم يثبت حتى الآن أن أيّاً من تلك الطرائق متوافق مع تجهيزة بسيطة قابلة للزرع في الجسم تستطيع تلقائياً وعلى نحو مستمر تحسُّس مستوى الغلوكوز في الدم. وهذا واحد من التحدِّيات الكبرى التي تواجه التحسُّس الكيميائي، وقد تعطيه التِقانة النانوية دفعة هائلة إلى الأمام.

ويمكن لتحسُّس الدنا أن يكون مجالاً واسعاً جداً يستطيع فيه علم النانو أن يُحسِّن الطب. عندما ناقشنا الحَوْسَبة بالدنا في الفصل الخامس، تحدثنا عن التهجين، أي قابلية الدنا للارتباط بشريط متمِّم له وعدم الارتباط بأي شيء

آخر. على سبيل المثال، إذا أردنا تحسُّس البُنية ذات السلسلة CGCGTTC، أمكننا فعل ذلك باستعمال الشريط GCGCAAG. هذا يعني أن شريطاً واحداً ذا ستة أسس، مثلاً، يمكن أن يحتوي على 4096 تركيبة (يمكن أن يتكوَّن كل أساس من أربعة مستويات A وC وG وT، ولذا يمكن لسلسة سُداسية الأسس أن تمتلك 4 × 4 × 4 × 4 × 4 ×4 قيمة مختلفة). ينتج من ذلك أنه إذا كان لهدف مُعيَّن، من قبيل سُمّ أو مكوَّر عقدي أو حُمّى، سلسلة دنا معروفة، أمكن استهداف مقطع صغير من سلسلة الدنا تلك، تحتوي على ما بين 10 و15 أساساً، يمكن تحسُّسه على نحو وحيد، دون أي خطأ بواسطة بُنية متممة ملائمة أُحادية الشريط. تُسمّى هذه البُنية أحياناً بصمة الدنا للمرض لأنه من المستحيل عملياً ارتكاب خطأ في تحديد المحلَّل حتى حين استعمال سلسلة طويلة نسبياً. في حالة شريط ذي 15 أساساً يساوي احتمال الخطأ واحداً من المليار لكل شريط يحصل اختباره.

أما أكثر تطبيقات تحسُّس الدنا إثارة للاهتمام فيكمن في إمكان استعمالها في المخبر على شريحة. وباستعمال الإمكانات التحليلية لتلك المخابر المكروية الكثيفة سوف يكون من الممكن وضع عدة مُحِسَّات اختبار على شريحة للكشف الفوري عن دنا فيروسات أو جراثيم ذات صلة بأمراض مختلفة توجد في الجسم. ويمكن استعمال هذه الشرائح أيضاً لتحسُّس وجود موادّ سامّة طبيعية أو صُنعية في مصادر المياه. أخيراً، ونظراً إلى أننا نعرف الآن كل الجينوم genom(*) البشري، فإنه يمكن استعمال الشرائح الحيوية لتحسُّس بصمات دنا معيّنة أو بصمات بروتينات معيّنة يُعرف أنها عيوب يمكن أن تؤدي إلى أمراض. وهذا يتيح للأفراد الذين في حالة خطر أن يتلقوا رعاية ويُجروا اختبارات بمعدلات أعلى. ويُعتبر تحسُّس الدنا المتعدد، أو سَلسَلة الدنا DNA sequencing(**)، هدفاً رئيسياً للمجتمع الطبي الحيوي لأنه سوف يمكِّن من تشخيصات متقدمة جداً، ومن الواضح أن مُحِسَّات الدنا سوف تكون الطريقة المُثلى (ولعلها الوحيدة) لمواجهة هذا التحدي.

ومن الممكن أيضاً صنع محسَّات تستفيد من تعرُّف الدنا. يعمل أبسط المُحِسَّات بإدخال شريط دنا متمّم للمحلَّل في المحلول الذي سوف يُختبَر.

(*) مجموعات الجينات أو المورّثات التي تحمل كل الصفات الوراثية (المترجم).

(**) سيرورة تحديد الترتيب التسلسلي لنوكليتيدات الدنا (المترجم).

فإذا كانت المادة المحلَّلة موجودة فإنها سوف تتهاجن مع دنا الاختبار وتكوِّن شريطاً مضاعفاً.

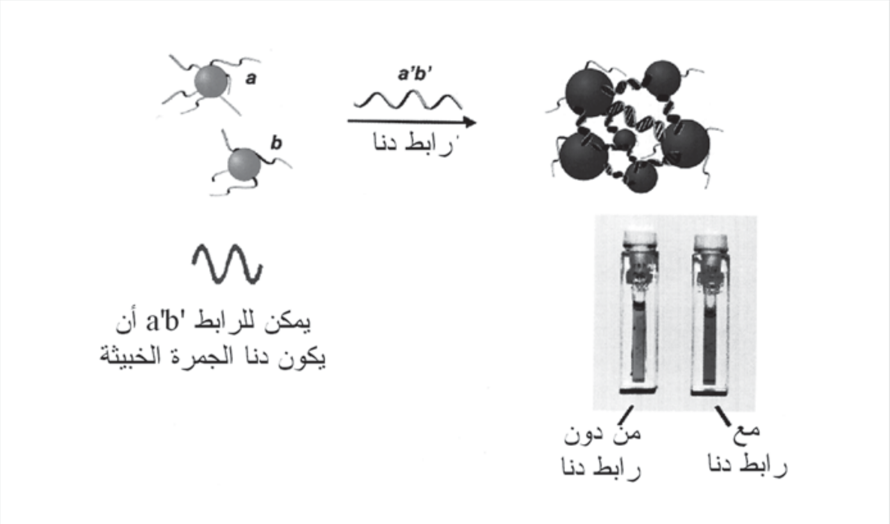
يؤكِّد حصول التهجين وجود المحلَّلة. إلا أن معرفة أن التهجين قد حصل ليس شيئاً سهلاً. فنحن لا نستطيع رؤية الأشرطة المضاعفة من دون أجهزة شديدة التعقيد. ولذا يُجرى تحديد حصول التهجين عادة بواسطة الكتلة. من الواضح أن الأشرطة المضاعفة تمتلك كتلة أكبر من الأشرطة المفردة، وإن كانت ليست أكبر كثيراً إذا كانت سلسلة الاختبار قصيرة، لأن وزن كل زوج أساس لا يتعدى وزن جُزَيء واحد أو نحو 1/1000000000000000000000 من الغرام. وهذا مقدار أصغر من أن يُقاس مباشرة بسهولة. لذا فإن إحدى الصعوبات الكبرى في تحسُّس الدنا هي تضخيم مفاعيل التهجين حتى يمكن قياسها بسهولة. وإحدى طرائق تحقيق هذا التضخيم هي تغيير الخواص البصرية لنقاط الفضة أو الذهب النانوية المعلقة بالدنا (المصطلح هو «الموظَّفة functionalized»)(*). وقد كان تشاد ميركين وروبرت لستينغر ومجموعتاهما لدى جامعة نورثوِسترن رواداً في الجمع ما بين المفاعيل البصرية (تذكَّر تغيُّر لون الذهب مع تغيُّر مقاس التكتلات الذهبية) والتعرُّف الجُزَيئي (الارتباط بالدنا المتمم). يُري الشكل 7 ـ 1 طريقتهم مع بعض النتائج العملية.

وبالكشف عن أشرطة الدنا الأحادية المعلَّقة بنقاط الذهب النانوية يُميِّز المُحِسّ أشرطةَ الدنا المستهدفة، وهذا يجعل كُرات الذهب النانوية تتقارب في ما بينها وتغيِّر لونها، على غرار ما يحصل في الزجاج المشوب. وبسبب تغيُّر اللون تُسمّى هذه المحسّات مُحِسَّات التحليل اللوني colorimetric sensors ويمكن أخذ نتائجها بالنظر إليها مباشرة (وضعت مجموعة جورج شاتس لدى جامعة نورثوِسترن الأساس النظري للطريقة). تُعتبر هذه الطريقة نموذجاً لطرائق التحسُّس التي تبحث عن أجزاء ضئيلة من الدنا.

ويمكن لمحسَّات التحليل اللوني أن تَستعمل، إلى جانب الدنا، تغيُّرَ لون نقاط نانوية معدنية لكشف جُزَيئات أخرى. وقد استعملت مجموعة ريتشارد فان دوين Richard VanDuyne لدى جامعة نورثوِسترن الطباعة باقتلاع الكُرات النانوية لتحضير نقاط ذهب ضئيلة على سطح وِفقاً لما ناقشناه في الفصل الرابع.

(*) أي إضافة المجموعة الوظيفية إلى المركَّب (المترجم).

وعلّقت المجموعة بُنية نانوية جُزَيئية تحتوي على موقع ارتباط حيوي (شيء من قبيل الجسم المضاد) بجسيْمات الذهب النانوية. وصُمِّم موقع الارتباط بحيث يتعرَّف محلَّلاً بروتينياً معيّناً (أي يرتبط به كيميائياً) على غرار ارتباط الجسيمات المضادة بالعوامل الحيوية التي تغزو جسمك. وحينما تظهر المادة المحلَّلة في محلول ترتبط بموقع التعرُّف، وهذا يغيِّر البيئة الكيميائية والفيزيائية للنقطة الذهبية التي يتغيَّر لونها قليلاً حينئذٍ. إن قياس هذا التغيُّر ممكن، وحساسية هذه الطريقة عالية جداً، وقد بيَّن فان دوين أن تلك النقاط النانوية الذهبية تستطيع فعلاً كشف جُزَيء منفرد من موادّ محلَّلة معيّنة.



الشكل 7 ـ 1: يُري الرسم العلوي كيفية تجمُّع النقاط النانوية في مِجسِّ قياس اللون معاً حين الارتباط بالدنا الهدف (الجمرة الخبيثة في هذه الحالة). تتصف النقاط المتجمّعة بلون يختلف عن لون النقاط غير المتجمِّعة وفق المبيَّن في الصورة الدنيا

اقتُبست بعد موافقة: *Mirkin Group, Northwestern University*.

أما صعوبة صُنع مُجِسَّات نانوية من هذا النوع لكل شيء فهي أنه كي تكون مفيدة يجب ألّا تعطي نتائج إيجابية زائفة. في حالة الدنا، من المستحيل تقريباً للتهجين أن يحصل وللمحسّ أن يعطي إشارة إذا لم يكن الجُزَيء المستهدف موجوداً. لكن إذا أردت بناء كاشف متفجرات كانت المشكلة أعقد كثيراً. فالنترات، وهي المجموعات الجُزَيئية المشترَكة في معظم المتفجرات، شائعة في

كثير من الموادّ المنزلية الأخرى، ومنها النقانق والأسمدة، وحتى يمكن أن توجد في جسم الإنسان. وإذا كشفتها بدقة جُزَيء واحد فإن كل شخص يجري فحصه سوف يبدو وكأنه يحمل قنبلة. ثمة كثير من البحث للالتفاف على هذه المشكلة في المتفجرات وفي غيرها من الموادّ المحلَّلة الشائعة.

الأنوف الإلكترونيّة

لقد تطرَّقنا إلى كيفية عمل الأنوف الحيوية باستعمال التعرُّف الجُزَيئي الذي يؤدّي إلى إرسال إشارة عصبية إلى الدماغ. أما في حالة الأنف الصنعي فإن أكثر بديل شيوعاً للغشاء الأنفي هو بوليمر ينقل الكهرباء. وحينما يتعرَّض البوليمر لأي جُزَيء مُعيَّن في الطور البخاري تتغيَّر ناقليته الكهربائية قليلاً. وفي الأنف الإلكتروني يُنشر بوليمر عشوائي، أو مزيج بوليمرات، بين أقطاب، وحين توضُع الجُزَيئات المطلوب شمّها على البوليمر (أو البوليمرات) سوف تتغيَّر خواصّ الناقلية في مناطق معيّنة بطريقة محددة خاصة بكل مادة محلَّلة. إن طبيعة هذا الكشف مثيرة للاهتمام لأنها تقوم على ما يُسمّى الشبكات العصبونية neural nets. والفكرة هي أن كل مُحِسّ سوف يعطي إشارة ذات جهد وتيار محددين يُقارنان بعد ظهورهما بقائمة الإشارات المعتمدة التي شمها الأنف من قبل. بهذا المعنى، يكون من الضروري «تدريب» الأنف الصنعي تماماً كما نتدرَّب نحن. حينما يسأل طفل أمه عن رائحة غريبة وتُجيبه أنها رائحة كذا فإن الطفل يتعلَّم. وبتحديد استجابة الأنف الإلكتروني لمجموعة من الدخول الجُزَيئية الشائعة يمكننا تحديد الإشارة الكهربائية الناجمة عن مادة محلَّلة ما. حينئذ، عندما يجعل بخار غير معروف المنظومة الكهربائية تستجيب بنفس الطريقة، يمكننا الاستنتاج أن المادة المحلَّلة موجودة. ونظراً إلى أن الخواصّ الكهربائية للجُزَيئات البوليمرية هي مفتاح الأنوف الإلكترونية فإننا نجد تقاطعاً هنا بين المُحِسَّات وواحد من مواضيعنا التالية، أي الإلكترونيات الجُزَيئية.

ثمّة عدة شركات تجارية تسوِّق حالياً أنوفاً إلكترونية (بأسماء من قبيل Cyrano) لتطبيقات منها كشف الغازات السامة والتحليل المَرَضي ومراقبة جودة الهواء وتفتيش الأغذية والمَقْيَسة.

ويتنبَّأ تشاد ميركين، وهو عالِم نانو ومؤسِّس لشركة ناشئة، بعالَم سوف يكون فيه الأطباء قادرين على تشخيص الأمراض والحالات في غرفة المعاينة فوراً وبدقة، ليس بتحليل الأعراض التي يشعر بها المريض فحسب، بل

بتحسُّس العوامل الممرِضة أيضاً التي في جسم المريض وفي دمه. وقد أسَّس ميركين مع الباحث الشهير روبرت لتسينغر الشركة الناشئة Nanosphere Inc. التي بدأت بتسويق منتجاتها من المُحِسَّات الحيوية. فباستعمال تقنيات التحسُّس الحيوي بمطابقة الدنا نفسها التي ناقشناها قاما عملياً بتطوير أسرع وأدق اختبار في العالم لكشف الجمرة الخبيثة، وهما يقومان بتطوير مجموعة من الاختبارات للأمراض الأخرى، ومنها الأيدز. وإذا نجحت شركتهما في تطوير منتَجاتها المقررة (النماذج الأولية منجزة) سوف يتمكن المساعدون الطبيون من الإشراف على جميع الاختبارات السائدة في العيادات أو بجانب سرير المريض. يُضاف إلى ذلك أن الجيش وقوى الأمن الداخلي سوف يتمكنون من كشف تلوُّث الرسائل والمباني وساحات المعارك بسهولة أكبر. وبمكاملة المُحِسَّات الحيوية ضمن مخبر على شريحة يمكن إجراء كثير من الاختبارات بالتوازي، وتنفيذ اختبارات متعددة في خطوة واحدة لأمراض مختلفة بدلاً من الاختبارات الإفرادية للسلّ والتهاب الكبد والحَصْبة والنُّكاف وغيرها مما يُجرى حالياً. وإذا حالفهما الحظ فإنهما سوف يتمكنان قريباً من إيجاد اختبار لداء الكلَب والكُزاز للتخلُّص من الحاجة إلى معالجة هذين المرضين بحُقَن مؤلمة من باب الاحتياط. وباستعمال هذه التقانات يمكن للشركة Nanosphere وغيرها من شركات المُحِسَّات القائمة على التِقانة النانوية أن تجعل اختبارات الأمراض رخيصةً وسهلة بقدر يكفي كي تكون شاملة حتى في البلدان ذات المداخيل المنخفضة. وهذا جزء من حُلم التِقانة النانوية التي سوف تغيِّر كلياً طريقة فعل الأشياء، ويمكن أن يصبح حقيقةً خلال السنتين أو السنوات الثلاث القادمة.

8 ـ التطبيقات الطبّية الحيويّة

■ العقاقير 128

■ التزويد بالدواء 130

■ المعالجة الضوئية الديناميكية 133

■ المحرّكات الجُزَيئية 134

■ الملتَقيات العصبية الإلكترونية 135

■ هندسة البروتينات 137

■ تسليط ضوء جديد على الخلايا : اللصيقات النانوية التلألؤ 138

اشتُهِر باراسِلسوس Paracelsus، الطبيب الذي ساعد على كسر أفكار العصور الوسطى الجامدة وتحديث الطب في القرن السادس عشر، بأنه كان أول من استعمل المركَّبات المعدنية وغير العضوية لمعالجة أمراض الإنسان. فقد كان معظم أطباء القرون الوسطى الذين أتوا قبله يعتقدون بأن من الضروري معالجة المشكلات العضوية بأدوية عُضوية، وهذا ما جعل ذخيرتهم من موادّ العلاج النباتية والحيوانية محدودة. وقد نجح الطب بعده وأصبح أشدّ علمانية وأعلى كفاءة.

وتنوي التِقانة النانوية الذهاب بفكرة باراسِلسوس إلى المستوى التالي لا باستعمال المعالَجات اللاعضوية فقط بل باستعمال المفاهيم اللاعضوية أيضاً. لقد شهد الطب الحيوي فعلاً عصر نهضة ثانياً حين اكتشاف الدنا وتحقيق فهم أفضل لكيفية عمل الأمراض والظروف الضارّة، إلا أنه لم يتمكَّن حتى الآن من استعمال كل تلك المعرفة بفاعلية لإيجاد علاجات لكثير من أسوأ مشكلات الإنسانية. أما علم النانو فسوف يساعد على استغلال تلك المعرفة مستفيداً من التطورات في العلوم الفيزيائية وفي الإلكترونيات النانوية. فالسلَّم النانوي هو السلَّم الطبيعي لجميع سيرورات الحياة الجوهرية، وهو السلَّم الذي تجب فيه مواجهة الأمراض ومعالجتها.

تنطوي التطويرات في الطب الحيوي النانوي على إمكان إيجاد تجهيزات قابلة للزرع في الجسم لمراقبة كيمياء الدم وإطلاق الدواء بحسب الحاجة، وهذا ما يُمكِن أن يكون شيئاً رائعاً للمصابين بمرض السكري والسرطان، ويمكن أن يؤدي إلى طرائق أفضل لتحديد النسل. أما العظام الصنعية والغضاريف والجلد التي لن يرفضها جهاز الجسم المناعي فهي قيد التطوير لتكون بدائل جديدة كلياً لترميم جسم الإنسان وإصلاحه. والتقدم في معالجة السرطان أصبح بحكم الأكيد ويمكن أن يتخذ شكل المعالجة الكيميائية والإشعاعية الموجّهة المحسّنة، أو أن يكون العلاج الشافي لبعض أنواع السرطان. إن اندماج المعرفة المتعددة الاختصاصات معاً في السلَّم النانوي سوف يكون واحداً من الفوائد العظيمة التي سوف يُدخلِها علماء النانو في حياتنا.

العقاقير

تُصنَّف العقاقير في فئات كثيرة. وبعضها مكوَّن من بُنى مستمرّة بسيطة من قبيل المراهم أو الغسولات التي تغيِّر خواصَّ الجلد أو تتحكَّم في تعرُّضه

للعوامل الخارجية التي من قبيل أشعة الشمس. ويتكوَّن بعضها من بُنى حيوية جُزَيئية كبيرة تؤثر على نحو متخصّص في بُنى جُزَيئية كبيرة أخرى في الجسم، ومن أمثلتها اللقاحات المكوَّنة أساساً من فيروسات معدَّلة. وتضم إحدى أكبر الفئات وأهمّها جُزَيئات أُحادية تؤثر خاصة في دنا وبروتينات الجسم وتتأثر بها. وتتضمّن هذه الفئة الأسبرين، ودواء مكافحة السرطان Cis-Platin، وجُزَيئات أعقد كثيراً من قبيل حاصرات بيتا beta blockers أو مضادات التهاب كالكورتيزون.

ونظراً إلى أن معظم تلك العقاقير الجُزَيئية نانوية المقاس فمن الجليّ أن تطوير العقاقير يجب أن يُجرى في السلَّم النانوي. حتى إن الارتباط بالسلَّم النانوي يشتد حين تصميم العقاقير خصوصاً لتتعامل مع الأهداف الحيوية. تعود سيرورة تصميم العقاقير النانوية هذه بجذورها إلى الأفكار الآلية mechanistic ideas(*) عن الهدف الحيوي للعقّار. على سبيل المثال، نظراً إلى أن الاكتئاب ينجم غالباً عن تركيزٍ شديد الانخفاض أو الارتفاع لجُزَيئات المرسلات العصبونية neurotransmitters (الحوامل الجُزَيئية التي تحمل رسائل بين الوصلات العصبونية synapses في الدماغ)، يتركَّز التطوير الذكي في السلَّم النانوي لمضادات الاكتئاب في زيادة ذلك التركيز بمنع أو خفض تدمير تلك الجُزَيئات من خلال تعديل خواص ارتباطها. تمثِّل إعادة التركيز إلى المستويات الطبيعية طريقة ناجعة لمعالجة أعراض بعض أنواع الاكتئاب. وقد حقَّق نفس النهج الآلي للمعالجة بالعقاقير عدداً من النجاحات ومنها تطوير عقاقير تُستعمل اليوم في معالجة الأيدز.

أما الطرائق النانوية، الحاسوبية والتجريبية، فتساعد على جعل سيرورة اكتشاف العقّار أكثر من مجرد مصادفة سعيدة أو دليل تجريبي، وتحوِّلها إلى عملية أقرب إلى التصميم. في أيام باراسِلسوس، وحتى في هذه الأيام، استُعمل كثير من العقاقير لأنها بدت ناجحة حتى لو كانت آليّة عملها غير مفهومة تماماً. وهذا أحد أسباب عدم معرفة الأعراض الجانبية للعقّار إلا بعد اختباره طبياً أو تسويقه. وهو أيضاً أحد أسباب سيرورة إقرار العقار الطويلة والمعقدة من قبل هيئة الدواء والغذاء الأميركية FDA. لكنْ نظراً إلى أن كثيراً من العقاقير النانوية

(*) مذهب فلسفي يقول بأن الأشياء، ومنها الكائنات الحيّة، هي كالآلات التي تتكوَّن من أجزاء تفتقر إلى علاقات متأصّلة في ما بينها، وتحرّكها قوى ومؤثرات خارجية (المترجم).

المقترحة سوف يعمل بآليات متخصصة جداً ومفهومة تماماً فإن أحد المفاعيل الرئيسية للعلم والتِقانة النانويين سوف يكون تسهيل تطوير عقاقير جديدة كلياً ذات أعراض جانبية أقل وأداء أكثر فائدة.

التزويد بالدواء

إن حجم الإنسان كبير جداً مقارنة بحجم الجُزَيء، وكي يكون العلاج ناجحاً من المهم أن تجد الجُزَيئات مواضع الجسم التي تكون فيها فعّالة: مضادّات الاكتئاب يجب أن تذهب إلى الدماغ، ومضادّات الالتهاب يجب أن تذهب إلى مواقع الإجهاد، والعقاقير المضادّة للسرطان يجب أن تذهب إلى مواقع الأورام. ويُقصد بالتوافر الحيوي bioavailability وجود جُزَيئات الدواء حيث تكون ثمة حاجة إليها في الجسم وحيث تكون أكثر فائدة. وتتركَّز مسألة التزويد بالدواء في جعل التوافر الحيوي أعظمياً خلال مدة معيّنة من الزمن وفي أمكنة محدَّدة من الجسم. وفي الواقع، تعاني منتجات صيدلانية تزيد قيمتها على 65 مليار دولار من التوافر الحيوي الضعيف.

نادراً ما تكون زيادة التوافر الحيوي بسيطة كبساطة كمّية الدواء المستعمل. ففي المعالجة الكيميائية مثلاً تكون بعض الأدوية المستعملة سامّة إلى حد ما عملياً، وزيادة الكميّة المستعملة يمكن أن تؤثِّر تأثيراً سيئاً في المريض أو حتى قد تؤدّي إلى وفاته. من ناحية أخرى، إذا أمكن إيصال الدواء مباشرة إلى موقع الورم قبل استفحاله (أي قبل انتشاره في الأعضاء المجاورة أو في الدم) دون أن يؤثِّر في بقية الجسم أمكن للمعالجة الكيميائية أن تصبح أعلى كفاءة وأقل إزعاجاً.

إن العلم والتِقانة النانويين مفيدان جداً في تطوير طرائق جديدة كلياً لزيادة التوافر الحيوي وتحسين توصيل الدواء. على سبيل المثال، يمكن تغليف الجُزَيئات ضمن فجوات نانوية في بوليمر يبتلعه المريض بوصفه جزءاً من قُرص دواء. وعندما تنفتح البُنية البوليمرية ضمن الجسم يتحرّر الدواء المغلَّف. هذه طريقة فعّالة لتكوين عقاقير تتحرّر مع الزمن بحيث إن القرص الذي يجري تناوله مرة في اليوم أو الأسبوع يمكن أن يستمر بتوفير الدواء ببطء على مدى مدة من الزمن. وثمة طريقة أخرى أبسط تتصف بأنها تجعل التوافر الحيوي الكلّي أعظمياً مدة قصيرة من الزمن، وهي أن يُطحن الدواء الصلب ليصبح مسحوقاً ناعماً، أو أحياناً لتصبح مقاسات الجُسَيْمات نانوية. يُجرى هذا لزيادة

المساحة السطحية وقابلية التفاعل، على غرار ما يحصل حين تصغير مقاسات جُسَيمات المحفِّزات (الفصل 6)، ولزيادة قابلية الانحلال في الجسم.

وجرى أيضاً تطوير طرائق للتزويد بالدواء أعقد كثيراً، منها إمكان إدخال الدواء إلى الخلايا عبر جدرانها. إن توصيل الدواء بكفاءة على درجة كبيرة من الأهمية لأن كثيراً من الأمراض، من فقر الدم الهلالي sickle cell anemia(*) حتى مرض ويلسون(**)، يعتمد على سيرورات ضمن الخلِيّة ولا يمكن التعامل معها إلا بإدخال الدواء إلى الخلِيّة. وكثير من جُزَيئات العقاقير لا يستطيع عبور غشاء الخلِيّة بسبب صعوبة إدخال جُزَيئات مستقطبة كهربائياً عبر غشاء غير مستقطب. لكن إحدى طرائق الالتفاف على هذه المشكلة هي تغليف الجُزيء المستقطب ضمن غلاف غير مستقطب يستطيع عبور غشاء الخلِيّة بسهولة. على سبيل المثال، يمكن استعمال جُزَيئات دنا صغيرة من النوع الذي يرتبط بجُزَيئات دنا مُمْرِضة غريبة ضمن الخلِيّة لتكون دواء. ولجعل عقاقير الدنا الصنعية هذه متوافرة جداً ضمن الخلِيّة يجب تمريرها عبر الغشاء. وإحدى طرائق فعل ذلك هي تغليف الدنا بالكوليسترول. والكوليسترول هو جُزَيء دُهنيّ نفور من الماء يستطيع عبور غشاء الخلِيّة الزيتي بسهولة. وبوضع دواء الدنا ضمن بطانية من الكوليسترول يمكن إدخاله إلى الخلِيّة حيث يكون أعلى فعالية، وهذا ما يدلّ على أن الكوليسترول يمكن أن يكون نافعاً. أمّا بُنى حُوَيصلات النقل liposome، القائمة على كُرات من جُزَيئات دهنية، والمستعملة لتغليف الدواء، فتعمل بطريقة مشابهة. وقد استُعملت تلك الحُوَيصلات في معالجة السرطان بحمل بروتينات قابلة للانحلال (سيتوكينات cytokines) من قبيل الإنترفيرون interferon إلى خلايا السرطان.

ويمكن أيضاً استعمال جُسَيْمات نانوية مغنطيسية من النوع المذكور في الفصل الخامس والمستعمل في ذاكرة الحاسوب في توصيل الدواء. ويرتبط المغنطيس النانوي بواسطة التعرُّف الجُزَيئي بالدواء الذي يجب توصيله. ثم يمكن لحقول مغنطيسية خارج الجسم أن تحرّك تلك النقاط النانوية وأن تتحكَّم في توافر الدواء الحيوي في المواضع التي يجب أن تكون فيها. أي يستطيع

(*) مرض وراثي طويل الأمد تتخذ فيه خلايا الدم الحمر شكل مِنجل (هلال) صلب (المترجم).

(**) مرض وراثي يتراكم فيه النحاس في الكبد والدماغ والعينين ويؤدي إلى اضطرابات كبدية وعصبية (المترجم).

الطبيب في المحصِّلة دفع الدواء عبر الجسم بنفس الطريقة التي تحرِّك بها بُرادة الحديد على سطح طاولة بواسطة مغنطيس يد.

وتقوم إحدى طرائق الجمع بين الموادّ الذكية والتزويد بالدواء ما يُسمّى بالاستجابة المقدوحة triggered response. توضع في هذه الطريقة جُزَيئات الدواء ضمن الجسم بحالة غير نشطة و«تستيقظ» حين التقائها بظرف مُعيَّن. والمثال البسيط على ذلك هو مضاد الحموضة المغلّف ببوليمر الذي لا ينحلّ إلا في وسط شديد الحموضة. أي إن مضادّ الحموضة لا يتحرر إلا بعد تلاقي الغلاف البوليمري الخارجي مع بُقعة شديدة الحموضة في الجهاز الهضمي.

والمثال الآخر هو موادّ العظام الصنعية التي نوقشت في الفصل الخامس. يمكن وضع الجُزَيئات، التي تتجمع معاً لتكوين أسطوانة العظم الصنعية، داخل أو خارج الجسم. وتُبرمج حين التصميم لتتجمع معاً لتكوين الأسطوانة الجاسئة فقط حينما تتعرّض لإشارة محفِّزة يمكن أن تكون بسيطة كبساطة التعرّض لماء سائل أو قصّ أو صدمة. ويمكن أن تعمل كما تعمل الصُفيْحات في تيار الدم.

لقد أدّى التصميم الجُزَيئي والتِقانة النانوية الجُزَيئية إلى كثير من العقاقير الذكية الجديدة. والمثالان الهامّان على ذلك هما ما يُسمّى بمانع الانتحار suicide inhibitor والمعالجة بجُزَيء الدنا. ليس المقصود بموانع الانتحار عملياً تثبيط السلوك الانتحاري بين الناس وفقاً لما توحي به التسمية، مع أنها يمكن أن تُستخدم لعلاج الاكتئاب. بل صُمِّمت لإيقاف فعل بعض الإنزيمات بجعل الإنزيمات نفسها تنتحر. تبدأ موانع الانتحار رحلتها بتجمع جُزَيئات حميدة في بُنية يميّزها الإنزيم الذي يُفترض أنها سوف تدمّره ويحاول القيام بوظيفته الطبيعية وتعديلها. إلا أن تلك الجُزَيئات تختلف قليلاً عن معظم الجُزَيئات التي يعدِّلها الإنزيم من حيث إن التعديل يؤدي إلى جُزَيء جديد ذي نهاية مكشوفة شديدة النشاط تبحث فقط عن شيء ترتبط به، وما ترتبط به هو الإنزيم نفسه. ويكون الرابط الناتج قوياً إلى حد أنه لا يُقاوَم عملياً. ولا تعمل البُنية المتحدة الجديدة (الإنزيم وجُزَيء العقّار) كالإنزيم وحده، ولذا يكون الإنزيم قد انتحر من خلال أدائه لوظيفته الطبيعية. لقد أنتجت شركات صيدلانية بعض هذه الأدوية، ومنها تلك التي طوَّرتها مجموعة ريتشارد سيلفرمان Richard Silverman لدى جامعة نورثوِسترن لمعالجة حالات مثل الصرع والاكتئاب اللذين يوجد في كل منهما مكوِّن هامّ من الفعل الإنزيمي. إنّ موانع الانتحار

تحدّ من النشاط الإنزيمي، وبذلك يمكن أن تكون فعّالة في التخلُّص من أعراض المرض.

والمثال الآخر هو المعالجة بجُزَيء الدنا، وهي نوع من المعالجة الجينية التي تستفيد من خواصّ الدنا الفريدة من حيث الارتباط الذاتي. حينما تطرَّقنا إلى مُحِسَّات الدنا في الفصل السابع، ناقشنا كيف أنه من الممكن كشف كينونة حيوية معيّنة بتكوين متمّم لبصمة الدنا الخاص بها ورؤية إن كان المتمّم ناجحاً في العثور على البصمة والارتباط بها. وفي بعض الظروف يمكن جعل هذا الارتباط غير عكوس، أي إن الدنا المسبِّب للمرض يمكن أن يُمنع من التضاعف ثانية وبذلك يحصل التخلُّص من تهديده. ونظراً إلى أن دنا العقار لا يرتبط إلا بهدفه، فإنه غير ضارّ البتّة للشخص الذي يستعمله. قد يمكن استعمال هذه الطريقة لتكوين مضادات فيروسات إلا أن تحوُّر الفيروسات يمثِّل مشكلة. وتعتمد جميع طرائق مقاربة المعالجة بجُزَيء الدنا الكثيرة على تِقنيات التركيب الكيميائي لصنع أشرطة الدنا المتمّمة التي ناقشناها في الفصل الرابع. وتمثِّل هندسة جُزَيء الدنا واحدة من أكثر المجالات نشاطاً في علم النانو الحيوي، بسبب تطبيقاتها الحيوية، ولأن ترابط المتمم في الدنا يوفِّر طريقة جيدة فريدة بكفاءتها لتجميع بُنى نانوية يمكن استعمالها في كثير من التطبيقات، إلى جانب تطبيقاتها الدوائية.

المعالجة الضوئية الديناميكية

إن كل طفل تقريباً يضيء راحة يده بمصباح ضوء يدويّ يرى كيف أن الضوء يمر عبرها ويبدو أحمر اللون حينما يخرج منها. علماً أن لون الضوء لا يكون أحمر لأن لون الدم أحمر فقط، بل وعلى غرار لون السماء الأزرق، لأن مقدار الضوء الذي يتبعثر بواسطة جسم ما يعتمد على طول موجة الضوء. ويستطيع الضوء ذو الموجة الطويلة أن يمر عملياً عبر النسيج الحيوي دون بعثرة شديدة، ولذا يمكن استعماله للتأثير في سيرورات الجسم.

وفي المعالجة الضوئية الديناميكية photodynamic therapy يوضع جُسَيْم ضمن الجسم ويُضاء بضوء خارجي يمكن أن يأتي من ليزر أو من مصباح، فيمتص الجُسَيْم الضوء، وبعدئذ يمكن أن تحصل عدة أشياء. فإذا كان الجسيْم مجرّد نقطة نانوية معدنية فإن طاقة الضوء سوف تسخِّنه وتُسخِّن أي نسيج مجاور له. وبوجود نقاط جُزَيئية معيّنة يمكن استعمال الضوء أيضاً لإنتاج

جُزَيئات أكسجين شديدة النشاط. وتتصف جُزَيئات الأكسجين تلك بالتفاعلية القوية وتتفاعل كيميائياً مع معظم الجُزَيئات العضوية المجاورة لها، ومنها جُزَيئات الأورام الخبيثة، وتدمّرها.

تُسمّى هذه الأفكار العلاجية بالمعالجة الضوئية الديناميكية، لا لأنها تستعمل الضوء (الفوتونات) فحسب، بل لأنها تعتمد أيضاً على ديناميك الحالة المهيَّجة للجُزَيئات أو النقاط النانوية المنغمسة في العملية. وتُعتبر المعالجة الضوئية الديناميكية هامة لعدة أسباب، أحدها هو أنها موجَّهة، خلافاً للمعالجة الكيميائية الشائعة. فجُزَيئات الأكسجين المتهيِّجة المتفاعلة كيميائياً، أو حتى حرارة النقاط الكمّومية المثارة، لا تظهر إلا حيث توجد الجسيْمات وحيث يُسلَّط الضوء. وهذا يعني أن المعالجة الضوئية الديناميكية، خلافاً للمعالجة الكيميائية، لا تخلِّف «آثارا سامّة» من الجُزَيئات الضارّة والمتفاعلة في كافة أرجاء الجسم.

ويمكن للجسيْمات المستعملة في المعالجة الضوئية الديناميكية أن تكون بسيطة كبساطة الجُزَيئات المتوسطة الحجم التي تستطيع تهييج الأكسجين حين إضاءتها. ويمكن أن تكون أيضاً معقدة كتعقيد البُنى الكمّومية المتعددة المكوِّنات، وأن «يتعرَّف» جزء منها أجناساً مستهدفة من قبيل الأورام (ويرتبط بها)، في حين أن الباقي يمتصّ الإشعاع ويسخِّن أو يوفِّر أكسجيناً متهيِّجاً. ويمكن أن تكون ثمة مكوِّنات أخرى لتأمين التوافر الحيوي.

تقوم المعالجة الضوئية الديناميكية على بُنى نانوية مختلفة، من جُزَيئات بسيطة حتى بُنى مركَّبة من عوامل تعرُّف جُزَيئية أو جُسيْمية نانوية أو حيوية. ومن الواضح أن تصميم واستمثال هذه البُنى هو مسألة تِقانة نانوية طبية واعدة بكونها طريقة غير جراحية للتعامل مع كثير من الأورام والسرطانات والأمراض.

المحرِّكات الجُزَيئية

ثمة مكوِّنات مختلفة ضمن البُنى الحيوية الكبيرة، التي من قبيل الخلايا، يجب أن تتحرَّك. وتكون أحياناً حركة بعض الجُزَيئات والشوارد، وحتى بعض البُنى الحيوية الكبيرة، بالتغلغل فقط. ومن أمثلة ذلك حركة المرسلات العصبية في الدماغ، وحركة الشوارد عبر قنوات غشاء الخلِيّة الخارجي. وعندما تكون أحجام الأجناس الجُزَيئية أكبر يصبح تغلغلها أصعب، ولذا طوَّرت الطبيعة

سلسلة من الآليات الخاصة لتحريكها ضمن الخلِيّة. وإحدى أكثر تلك الآليات روعة هي المحرّك الجُزَيئي.

اكتُشفت المحرّكات الجُزَيئية molecular motors أثناء دراسة إحدى وظائف توليد الطاقة في الجسم بواسطة ما يُسمّى مِضَخّة الصوديوم والبوتاسيوم التي تقوم بصرف طاقة ثلاثي فوسفات الأدنوزين adenosine triphosphate ATP بواسطة إنزيم النقل ATPase. وهذا إنزيم معقد مسؤول عن إنتاج وتحويل الطاقة المخزونة في جُزَيء الـ ATP الذي يمثِّل عُملةَ الطاقة الموحَّدة في الجسم التي تزوِّد كل شيء فيه بالطاقة، ومنها العضلات. يعمل ثلاثي فوسفات الأدنوزين مع الصوديوم والبوتاسيوم كالمحرّك أو المِضَخّة الدوّارة فعلاً: تدور الوحدة المركزية في البُنية النانوية حول نقطة مركزية، ويتفاعل جزؤها الخارجي على نحو مختلف مع المجموعات الكيميائية الموجودة في المحيط.

وهذه الحركة الدورانية هي واحدة من عدة آليات تحريك جُزَيئية التي أصبح الآن من المفهوم أنها تؤدي أدواراً هامةً في وظائف الخلِيّة الحيوية. وتمكِّننا المحرّكات الجُزَيئية أيضاً من مراقبة توافر مكوِّنات الخلِيّة المختلفة أثناء تجوالها ضمن البُنية الخلوية. والكينزين kenisin هو محرك جُزَيئي نانوي ينقل حمولات ضمن الخلِيّة بالتحرُّك على طول مسارات تُسمّى الأُنيبوبات المكروية ضمن الخلِيّة. وهو يمثِّل بذلك أصغر نوع من القطارات في العالم.

والمحرّكات الجُزَيئية مسؤولة أيضاً عن تحويل الإشارات في أُذن الإنسان. ويُسمّى المحرّك الجُزَيئي في هذه الحالة برستين prestin، وكان بيتر دالُّس Peter Dallos ومجموعته لدى جامعة نورثوِسترن أول من لاحظه.

ويمكن للمحرّكات الجُزَيئية أن توفِّر تسارُعاً وطاقة تحريكية للبُنى النانوية الصُّنعية ضمن الجسم وضمن تجمّعات البُنى النانوية التي هي أكثر تعقيداً. وتُعدُّ المحرّكات الجُزَيئية من بين البُنى النانوية الكثيرة الشديدة التعقيد التي تطورت عبر مسيرة ارتقاء الحياة.

الملتَقيات العصبيّة الإلكترونيّة

قطعت المواضيع التي ناقشناها حتى الآن شوطاً بعيداً في طريقها نحو التطبيق الفعلي، أو أصبحت فعلاً قيد الاستعمال (في بعض الحالات). وفي هذا المقطع سوف نتقدم قليلاً إلى الأمام لنناقش واحداً من الأهداف المنظورة للتِقانة

النانوية، وهو الملتَقيات العصبيّة الإلكترونية neuroelectric interfaces، أي بناء تجهيزات تمكِّن من وصل الحواسيب بالجملة العصبية.

يتطلب بناء الملتقى العصبي الإلكتروني بناء بُنية جُزَيئية تمكِّن من كشف النبضات العصبية والتحكُّم فيها بواسطة حاسوب خارجي. وتتجلّى صعوبة تحقيق ذلك في الجمع ما بين التِقانة النانوية الحاسوبية والتِقانة النانوية الحيوية. تنقل أعصاب الجسم الرسائل من خلال السماح لتيارات كهربائية (ناجمة عن حركة الشوارد) بالتدفق بين الدماغ والمراكز العصبية في مختلف أنحاء الجسم. وأهمّ الشوارد لهذه الإشارات هي شوارد الصوديوم والبوتاسيوم التي تتحرك على طول أغماد وقنوات تكوَّنت خاصة للسماح بحركة أيونية سريعة رشيقة يمكن التحكُّم فيها. وهذه هي الآلية التي تمكِّنك من الشعور بأحاسيس من قبيل وضع قدمك في ماء ساخن والشعور بالحرارة تنتقل من العصب المحلي عبر المنظومة العصبية إلى الدماغ حيث تحصل ترجمتها ومعالجتها. وتؤدي هذه العملية غالباً إلى تسريب استجابة إلى منظومة العضلات تتجلّى، مثلاً، في سحبك لقدمك من الماء الساخن. إن الغرض من تِقانة الملتقى العصبي الإلكتروني هو التمكُّن من تسجيل وتفسير تلك الإشارات والاستجابة لها بواسطة حاسوب.

إلا أن الصعوبات هائلة: فالبُنى النانوية التي سوف توفِّر الملتقى يجب أن تكون متوافقة مع جهاز المناعة في الجسم كي تبقى مستقرة ضمنه مدة طويلة. ويجب أن تكون أيضاً قادرة على تحسُّس تيارات الشوارد وعلى جعل التيارات تتدفق عائدةً لإعطاء منظومة العضلات التعليمات لتنفيذ حركات معيّنة. إن أكثر البُنى ملاءمة لذلك هي النواقل الجُزَيئية molecular conductors، وهي جُزَيئات تتصف ناقليتها الأيونية الشاردية أو الإلكترونية بالمقدرة على الاتصال بالحركة الأيونية الشاردية في الألياف العصبية.

ومع أن ثمة بحوثاً نشطة في هذه الموضوع تحصل في مراكز متعددة، لم يُنشر إلا القليل عن تقدم عملي فيها حتى الآن. فتوصيل هذه البُنى بالأسلاك شديد الصعوبة، لا لأن النواقل الجُزَيئية يجب أن تحقِّق الوصل الإلكتروني فحسب، بل لأنه يجب أيضاً توضيعها بدقة ضمن الجملة العصبية بحيث تستطيع رصد الإشارات العصبية والاستجابة لها.

إن الحاجة إلى هذه البُنى هائلة. فكثير من الأمراض يترافق بضعف

الجملة العصبية. على سبيل المثال، يترافق مرضا تصلُّب النُسُج المتعدد ومرض التصلُّب الضموري الجانبي (مرض لو غِريك Lou Gehrig) مع اضطرابات في الجملة العصبية. يُضاف إلى ذلك أن كثيراً من الأضرار الجسدية المأساوية، من قبيل فقد قدم أو إصبع، حتى تأذِّي الجملة العصبية في الحوادث المرورية، يمكن أن تؤدي إلى تعطُّل الجُمل العصبية وإلى حالات من الشلل النصفي أو الكلّي. فإذا استطاع حاسوب، من خلال ملتقى عصبي إلكتروني، التحكُّم في الجملة العصبية أمكن السيطرة على كثير من تلك المشكلات بإحكام من خلال تعويضات فعّالة تتجاوز مباشرة مفاعيل الأمراض والأضرار الجسدية المأساوية.

هندسة البروتينات

إن البروتينات هي أكثر الجُزَيئات جلاء في المنظومات الحيوية. فأظفار الأصابع والشعر والجلد والدم والعضلات والعيون مكوَّنة جميعها من البروتينات. وكثير من الأمراض يقوم على البروتينات. وبعض الأمراض المخيفة، ومن أمثلتها جنون البقر ومرض كرويتسفلت ـ جاكوب Creutzfeldt-Jakob(*)، تنجم ببساطة عن اتخاذ بروتين شكلاً غير صحيح (انطواء على نحو خاطئ). وتسبّب البروتينات المطوية طيّاً خاطئاً أيضاً عدداً من الأمراض الجينية الموروثة من قبيل مرض تايْ ساخس Tay-Sachs(**) وفقر الدم الهلالي.

وعلى غرار الدنا والبوليمرات، تتألف البروتينات من سلاسل طويلة من الوحدات الجزئية. توجد في البروتين 20 وحدة جزئية طبيعية تُسمّى الحموض الأمينية. ويتألف البروتين من سلسلة طويلة منتقاة من تلك العشرين حمضاً نووياً تتجمع ذاتياً على شكل بُنية مطوية معقدة.

ويمكن تركيب بروتينات صُنعية لأن الكيميائيين وعلماء الأحياء طوَّروا طرائق لسَلسَلَة العشرين حمضاً نووياً معاً، وبعض الحموض الأمينية الإضافية غير الطبيعية، في سلسلة طويلة ملائمة. وهندسة البروتينات protein engineering

(*) مرض دماغي خطير ونادر يُسبِّبه فيروس غير معروف، ويتميز بتدهور التفكير والذاكرة المطّرد وانعدام التحكُّم في العضلات تدريجياً (المترجم).

(**) اضطراب وراثي في استقلاب الشحوم يحصل غالباً لدى أشخاص من أصل يهودي في شرق أوروبا. ويؤدي تراكم الشحوم في نُسُج الأعصاب إلى موت مبكر في الطفولة (المترجم).

هي علم صنع البروتينات واستعمالها في الطب وفي تطبيقات أخرى من قبيل الأغذية التركيبية.

وهندسة البروتينات هي واحدة من طرائق البُنية النانوية التي تقوم عليها تِقانة استثنائية هامة تُسمّى أحياناً التِقانة الحيوية. من حيث المعنى، إن التِقانة الحيوية في الأصل هي استعمال طرائق تركيب الدنا لإنتاج بروتينات معيّنة. فنظراً إلى أن الدنا يحمل رماز تصنيع البروتين استعار التقانيون الحيويون آليات تصنيع بروتينات متعضّيات بسيطة من قبيل الإشيريشيا كولي E. coli، وهي جرثومة توجد في الأمعاء، ووضعوا فيها دنا صُنعياً خاصاً بهم. وكان تصميم البروتين ممكناً لأننا نعرف الرماز الجيني الذي يمكِّن دنا مُعيَّناً من إنتاج بروتين مُعيَّن.

لقد أُنتِج كثير من البروتينات بهذه الطريقة، وكانت لبعضها تطبيقات في الطب. وإحدى الحالات المدهشة تلك المتعلقة بعامل نموّ الإنسان، الذي تُنتِجه التِقانة الحيوية ويُستعمل في الطب على نطاق واسع.

وهندسة البروتينات هي واحدة من أكثر مجالات التِقانة الحيوية النانوية نضجاً لأننا نعرف فعلاً كيفية صنع عدد كبير من البروتينات. وباستعمال الجينوم البشري، فإن حقلي علم ما بعد الجينوم post-genome(*) وعلم جينوم proteomics(**) البروتينات مكرّسان الآن لفهم ما تفعله البروتينات وكيفية تعديل وظائفها أو تحسينها ببُنى تركيبية، ومنها بروتينات صنعية كلياً.

تسليط ضوء جديد على الخلايا: اللصيقات النانوية التلألؤ

ثمة عدد كبير من الأسباب يجعل علماء الأحياء يهتمون بحركة مجموعة معيّنة من الخلايا والبُنى الأخرى حين تحرُّكها عبر الجسم أو عبر عيّنة في صحن. فتعقُّب الحركة يمكن أن يساعدهم على تحديد مدى جودة توزُّع الأدوية وكيفية استقلاب الموادّ في الجسم. إلا أن تعقُّب مجموعة صغيرة من الخلايا أثناء حركتها عبر الجسم هو مهمة مستحيلة من حيث المبدأ. فالإبرة في كومة قش هي على الأقل جسم من معدن كثيف في تلة من الكتلة الحيوية الخفيفة،

(*) علم الحقبة التالية لتوفُّر كامل معلومات الجينوم (المترجم).

(**) فرع من علم الوراثة (الجينات) يدرس مجموعة البروتينات المرمَّزة في الجينوم بأسرها (المترجم).

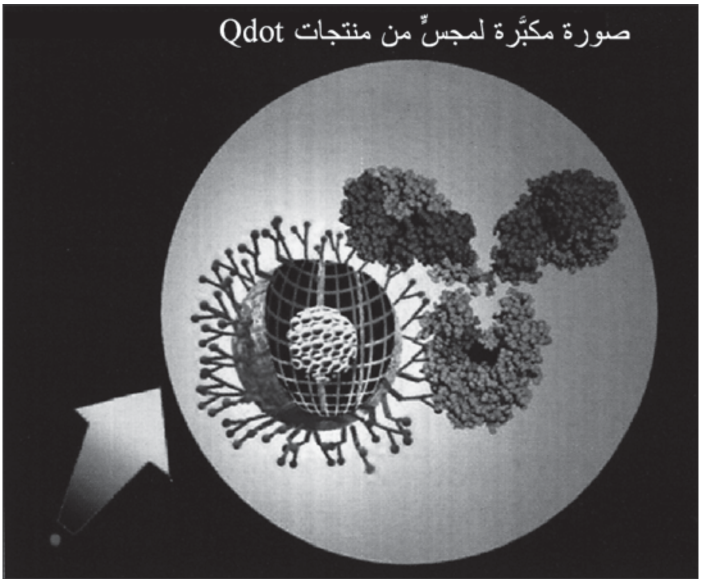
وتستطيع العثور عليها بالغربلة أو بواسطة كاشف معادن. أما الخلايا فلا توجد بينها فوارق مادية ملحوظة، وهي تشابه عادة في حجومها وأشكالها الخلايا الأخرى التي من نوعها. وما لم تكن قادراً عملياً على تعليق شيء مرئي فريد بالخلِيّة فإنها سوف تختفي في الجسم كحبة رمل على الشاطئ.

في الماضي التفّ العلماء على تلك المشكلة بصبغ الخلايا. فإذا كانت عيّنة من الخلايا خضراء، وكانت جميع الخلايا الأخرى واضحة تقريباً، كان من السهل العثور على العيّنة. لكن الأصبغة العضوية التي استُعملت في الماضي يمكن أن تكون سامّة ويجب تهييجها أيضاً بضوء ذي تردّد مُعيَّن لجعلها تتلألأ. أما في الآونة الأخيرة فقد استُعيض عن الأصبغة ببروتينات تتلألأ طبيعياً بلون أخضر أو أصفر. لكنْ ما زال من الضروري تهييج تلك البروتينات أيضاً بضوء ذي تردّد مناسب كي تعمل. وتمتص الأصبغة والبروتينات المختلفة أضواء ذات تردّدات مختلفة، ولذا إذا كانت ثمة عدة عيّنات تريد تعقُّبها في نفس الوقت احتجت إلى عدد من منابع الضوء يساوي عدد العيّنات. وهذا يمكن أن يكون مشكلة.

عالج بول أليفيساتوس A. Paul Alivisatos ومونغي باوندي ومجموعتاهما هذه المشكلة بما يُسمّى الآن اللصيقات المتلألئة luminescent tags. وتلك اللصيقات هي نقاط كمّومية معلّقة غالباً ببروتينات تمكِّنها من اختراق جدران الخلايا. وتتصف تلك النقاط الكمّومية بخاصيّة نانوية هي أن ألوانها تعتمد على حجومها. ويمكن صُنعها من موادّ خاملة حيوياً (موادّ لا تتفاعل مع السيرورات الحيوية، ولذا تكون غير سامة) وبحجوم مختلفة وفق الرغبة. هذا يعني أنه إذا اخترنا المقاسات بحيث يكون تردد الضوء، اللازم لجعل مجموعة من النقاط الكمّومية تتلألأ، مضاعفاً زوجياً للتردد اللازم لجعل مجموعة أخرى من اللصائق تتلألأ، أمكن إضاءة كليهما بنفس منبع الضوء. وبضربة واحدة، تحلّ هذه اللصائق مشكلتين رئيسيتين من مشاكل الأصبغة العضوية القديمة: السُمِّية وإمكان استعمال أكثر من لون واحد للصائق في الوقت نفسه مع منبع ضوء واحد.

إن علم اللصائق المتلألئة علم بسيط، وهو يُري كيف أن الخواصّ الجديدة المكتشفة في السلَّم النانوي يمكن أن تصبح عملية بسهولة. وقد أنشأ

باوندي وأليفيساتوس شركة Quantum Dot Corporation ليمثِّل اكتشافهما نواة منتجاتها من النقاط الكمّومية Qdot. في الـ Qdot تُحاط النقطة الكمّومية بقوقعة تحميها من محيطها وتضخّم خواصّها البصرية. ويمكن تعليق البُنية الناتجة بحوامل مختلفة لنقلها إلى أي شيء يحتاج إلى لصيقة. يُري الشكل 8 ـ 1 كيفية عمل النقطة الكمّومية.



الشكل 8 ـ 1: رسم توضيحي لمِجَسّ Qdot.

اقتُبست بعد موافقة شركة: *Quantum Dot Corporation*.

9 ـ البصريّات والإلكترونيّات

«لدينا خطة لإعادة اختراع الدارة المتكاملة بمكوِّنات جُزَيئية بدلاً من أنصاف النواقل».

ستان ويليامز Stan Williams
مدير بحوث الميكانيك الكمّومي لدى الشركة HP.

- طاقة الضوء والتقاطها، والكهرضوئيات 142
- توليد الضوء 147
- نقل الضوء 149
- التحكُّم في الضوء واستعماله 150
- الإلكترونيّات 152
- أنابيب الكربون النانوية 153
- الإلكترونيّات الجُزَيئية الطريّة 154
- الذواكر 155
- البوّابات والقواطع 157
- البُنيانات 159

كانت الإلكترونيات إلى حد بعيد الدافع الرئيسي للاهتمام الحالي بالتِقانة النانوية. فصناعة الإلكترونيات تواجه النهاية المتوقعة لمقدرتها على الاستمرار في تحسين تِقاناتها بإدخال تغييراتٍ في تِقنيات طباعة الشرائح الحالية، وهي تبحث عن البدائل. والتِقانة النانوية توفِّر عدة حلول ممكنة لهذه المشكلة، وحتى إنها تمكِّن من إدخال الحواسيب في الملابس وورق الجدران وفي أي مكان آخر، وفي جميع ما يخص الهدف السامي لجعل حياة الناس أسهل. وهذا التطبيق ينطوي على ما يُسمّى بالحَوْسَبة العميمة pervasive computing.

إلا أن ما تنطوي عليه التِقانة النانوية للبصريات والإلكترونيات وصناعة الطاقة يفوق كثيراً صُنع شرائح مكروية أصغر وأسرع وأفضل. تخيَّل لصيقات ضئيلة غير مرئية تستطيع تعريف كل شيء من هدايا عيد الميلاد المرسلة بالبريد حتى الكتب في المكتبة والمجوهرات بحيث يكون تعريفها وتعقُّبها آنياً. وتخيَّل تحويلاً للطاقة الشمسية عملياً فعلاً وذا مردود جيد ويُنتج طاقة متجددة بتكلفة أقل من تكلفة الوقود الأحفوري. وتخيَّل أسقفاً وجدراناً كاملة مصنوعة من أضواء صافية أو أضواء باردة ملوّنة. إن ثمة سعياً حثيثاً وراء جميع تلك التطبيقات باستعمال التِقانة النانوية في المجالات العامة للموادّ الإلكترونية والبصرية والمغنطيسية، ولعل هذا الحقل هو أكثر مجالات العلم النانوي تقدماً تقانياً، لأنه يتضمّن الملتقى بين التِقانة النانوية و«التِقانة المتقدمة»، أي تِقانة المعلومات.

ونظراً إلى أن الإلكترونيات هي من نواح عدة أكثر تطبيقات علم النانو جلاء فقد كان هذا الفصل أطول الفصول الأربعة التي تتطرَّق إلى تطبيقات محددة. لذا سوف نجزِّئه إلى قسمين رئيسيين، الأول عن الضوء والطاقة، والثاني عن الإلكترونيات والمغنطيسيات.

طاقة الضوء والتقاطها، والكهرضوئيات

باستثناء الطاقة النوويّة والطاقة الحراريّة، يعود أصل جميع أنواع الطاقة على الأرض إلى الشمس. فالنفط والفحم والغاز الطبيعي وأنواع الوقود الأُحفوري الأخرى تكوَّنت كلياً تقريباً بسيرورة التركيب الضوئي في النبات، أي طريقة النباتات لالتقاط الطاقة الشمسية. وتؤدي الطاقة الشمسية أيضاً إلى تبخُّر الماء، وعلى نحو غير مباشر، إلى المطر والطاقة الكهرمائية. وهي تستمر في تدفئة العالم، وفي تحريك الرياح التي توفِّر لنا الطاقة، وفي إنتاج الكتلة الحيوية التي توفِّر الغذاء لجميع الكائنات الحية. لذا يكون من الواضح أن الضوء هو

المصدر الرئيسي للطاقة، إضافة إلى كونه وسيلة للاتصالات وخزن البيانات وعرض المعلومات. والبُنى النانوية ضرورية لكل هذه التطبيقات.

يحصل التركيب الضوئي الطبيعي في كثير من المتعضّيات. وأكثرها جلاء وأهمية هي النباتات التي تستعمل الطاقة الشمسية لتركيب الموادّ النشوية التي تتكوَّن منها، ولإنتاج الأكسجين. لذا فإن التركيب الضوئي لا يوفّر لنا طاقتنا فقط، بل الهواء الذي نتنفسه أيضاً.

وجهاز التركيب الضوئي الطبيعي هو مجموعة بالغة التعقيد حسنة التصميم من البُنى النانوية المتشابكة. وفي الواقع، يُعدُّ فهم مراكز التركيب الضوئي في الجراثيم من قِبلنا أكثر اكتمالاً من تلك التي في النباتات الخضراء. ففي تلك البُنى الجرثومية تَضمُّ أغشيةٌ عدة مكوِّنات نانوية، مشاركة في بُنية الخلِيّة، معاً بنفس الطريقة المألوفة في بناء الخلِيّة. ويعمل التركيب الضوئي باستعمال طاقة ضوء الشمس لفصل شحنات موجبة وسالبة لتكوين تدرُّجات من شِحنة البروتون. وتنتُج من عودة هذه الشحنات للاتحاد طاقة.

ثمة ثلاث بُنى نانوية رئيسية في هذه السيرورة: الهوائي، ومركز التفاعل، وبُنية إدارة شِحنة الغشاء. يتألف الهوائي من عدد كبير من مراكز امتصاص الضوء الجُزَيئية، كل منها يمتص طاقة من ضوء الشمس وينقلها إلى وحدة تجميع جزئية تُسمّى مجمَّع جَنْي الضوء light harvesting complex. ويتكوَّن المجمَّع من حلقات من الجُزَيئات الكبيرة المنفصلة التي تتبادل الطاقة في ما بينها إلى أن تصبح الطاقة جاهزة للنقل إلى البُنية النانوية الدنيا التالية، أي إلى مركز التفاعل. ومركز التفاعل هذا هو مكان استعمال الطاقة لفصل إلكترون عن الشِحنة المعاكسة (التي تُسمّى ثقباً). ويُدفع الإكترون بعيداً جداً عن الثقب (تصل المسافة بينهما إلى 2 نانومتر) لتلتقطه بُنية نانوية أخرى تتألف من ذرّة حديد وبضعة جُزَيئات عُضوية تُسمّى الكوينونات quinones. وتتضمّن الخطوة الأخيرة استعمال هذه الشِحنة المنقولة في منظومة إلكترونية لتكوين تدرُّج لشوارد الهدروجين عبر الغشاء. وتسمح بعدئذ بُنى مترابطة في الغشاء شديدة التعقيد بعودة الشحنات إلى الاتحاد لتؤدي في النهاية إلى تكوين ثلاثي فوسفات الأدِنوزين، وهو الجُزيء الأساسي لخزن الطاقة وحملها في عالم الأحياء.

تلتقط مجموعة البُنى النانوية المعقدة الجميلة والأنيقة هذه الطاقةَ بتنفيذها عملياً ثلاث وظائف: يُلتقط الضوء، ويُستعمل لفصل شِحنات موجبة عن

الشحنات السالبة، وتحصل إعادة اتحاد للشحنات على نحو تُستخلص فيه الطاقة الكولونية الناجمة عن الاتحاد وتُستعمل بوصفها منبع طاقة مفيدة.

لقد بقي بناء تجهيزات تركيبية لالتقاط ضوء الشمس وإنتاج طاقة حلماً علمياً مدة طويلة. فقد استُعملت طرائق شمسية لغلي الماء وإذابة الجليد وتدفئة الحجارة في الماضي. أما أكثر الأفكار لفتاً للانتباه فتتضمّن بناء تجهيزات تحوِّل طاقة الشمس مباشرة إلى كهرباء، أو إلى طاقة كيميائية مخزونة على شكل جُزَيئات هدروجين يمكن الحصول عليها بشطر الماء بواسطة الطاقة الشمسية، أو حتى على شكل جُزَيئات ثلاثي فوسفات الأدِنوزين. ويمكن لجميع طرائق الخزن الكيميائية تلك أن تكون ذات كفاءة لتوليد الطاقة، إلا أنها تتطلب خطوة تحويل إضافية لتوليد طاقة كهربائية مفيدة (على غرار الوقود الأُحفوري الذي يمثِّل صيغة من الطاقة الشمسية المخزونة كيميائياً). لذا تركَّز معظم الاهتمام في مجال الكهرضوئيات photovoltaics، وهي تجهيزات تحوِّل طاقة ضوء الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية.

تركَّزت بحوث تحويل الطاقة الشمسية كهرضوئياً على نحو كبير في استعمال أنصاف النواقل، وخاصة السليكون. توجد خلايا السليكون الكهرضوئية في الإنشاءات المنزلية والصناعية ودُمى الأطفال وفي المواقع النائية التي تتطلب توليداً محلياً للطاقة، وفي الآلات الحاسبة المحمولة (لعلّها أكثر الأمثلة جلاء) التي تستعمل طاقة الضوء. وتحاكي هذه البُنى التركيبَ الضوئي، لكن جزئياً فقط. فليس ثمة من هوائيات فيها، بل يُسلَّط الضوء على نصف ناقل (بلّورات سليكون أُحادية عادة أو سليكون متعدد البلّورات، ويمكن استعمال أنصاف نواقل أخرى أيضاً)، فيمتص طاقة الضوء، وتدفع الحالات المتهيّجة في نصف الناقل الإلكترونات والثقوب إلى الانفصال والذهاب إلى موقعين متقابلين في خلِيّة الطاقة يُسمّيان مجمِّعي التيار اللذين ينجم الفرق بين طاقتيهما عن امتصاص الطاقة من منبع الضوء. وتُترك بعدئذ الإلكترونات والثقوب لتتحد ثانية بتمرير الإلكترونات عبر سلك خارجي وتوليد تيار كهربائي، حيث يُستعمل ذلك التيار لتغذية منزل أو آلة حاسبة بالكهرباء، أو يمكن بيعه إلى شبكة الكهرباء العامة.

ثمة العديد من الاعتبارات الاقتصادية والعلمية التي تحدِّد إنْ كان التحويل الكهرضوئي الشمسي عملياً. ومن تلك العوامل مقدار ضوء الشمس الساقط على مساحة معيّنة، وجمالية تشييد اللوحات الشمسية، وتكاليف الكهرباء السائدة

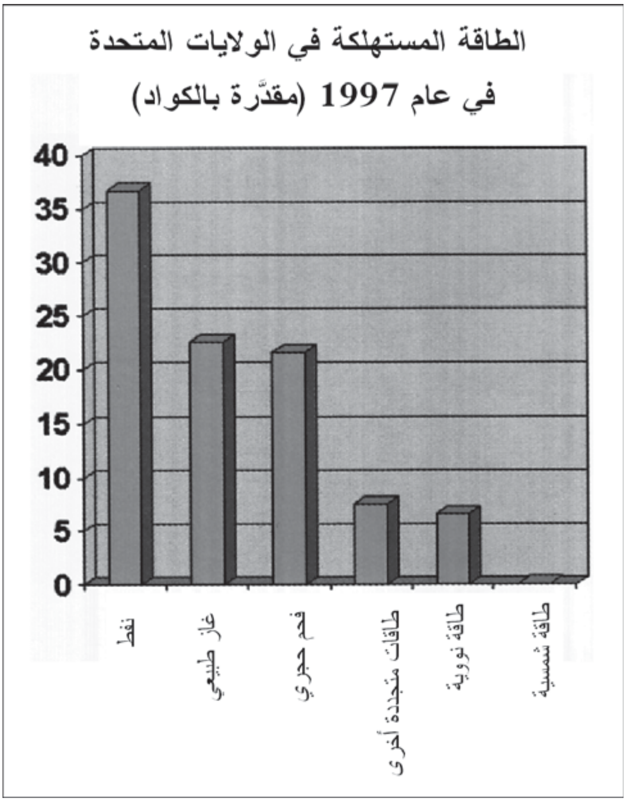
وتوافرها. ومن الجوانب التي هي أقرب إلى العلمية مردود الخلِيّة الشمسية الذي يعرَّف بدلالة مقدار الطاقة الكهربائية المستخلص فعلاً من مقدار مُعيَّن من طاقة ضوئية أولية واردة من منبع ضوء (طاقة الخرج مقسومة على طاقة الدخل). ومن العوامل الأخرى تكلفة صنع الخلِيّة، وتكلفة الاستعمال النهائي، وقضايا الصيانة والسُمِّية وغيرها. أما مصدر القلق الرئيسي حتى الآن في البلدان المتقدمة، ومنها الولايات المتحدة، فهو التكلفة الأولية لتلك الخلايا الشمسية. لذا يُجرى بحث حثيث لخفض تلك التكلفة. وإلى أن يُصبح الإنتاج الكمّي الواسع النطاق ممكناً، سوف تبقى عقبة السعر صعبة التجاوز، إلا إذا أصبحت الطاقة الشمسية من أفضليات السياسة العامة، وكانت ثمة طلبات شراء تكفي لتشغيل مصانع الطاقة. وهنا يمكن للفتوحات في التِقانة النانوية أن تؤدي إلى تغيُّرات هائلة.

لا ريب في أن التركيب الضوئي الطبيعي لا يحصل ببلّورات أنصاف نواقل، بل بالجُزَيئات. لذا فإن إحدى مقاربات علم النانو الرئيسية لمسألة تحسين كفاءة تحويل الطاقة الشمسية هي ما يُسمّى أحياناً التركيب الضوئي الصُّنعي artificial photosenthesis باستعمال بُنى نانوية تقوم على الجُزَيئات لالتقاط الضوء وفصل الشحنات الموجبة والسالبة. والبُنية الجُزَيئية النانوية التي تُستعمل لهذه الغاية تأتي بعدة صِيَغ مختلفة. وفي أبسط الحالات، يوجد في الجُزَيء جزء فاعل واحد فقط يمتص عملياً طاقة الضوء. وتؤدي الحالة الجُزَيئية المتهيِّجة عندئذ إلى توجُّه الإلكترون إلى قُطب، والثقب إلى القطب الآخر. إن هذه البُنى بسيطة نسبياً، لكن مردودها ليس جيداً، لأن مقدار الامتصاص محدود، ولأن فصل الشِحنة وإرسالها إلى القطبين يمكن أن يكون سيئاً جداً.

وتتضمّن بُنى أكثر تعقيداً ما يُسمّى الزوجيات dyads أو الثُلاثيات triads أو حتى الخُماسيات pentads. وهذه طريقة إغريقية للقول إن البُنية النانوية الجُزَيئية تحتوي على عدة وحدات جزئية، إحداها تلتقط ضوء الشمس بالامتصاص، في حين أن الأخريات هامة لتسهيل فصل الإلكترون عن الثقب بكفاءة.

وتتصف البُنى النانوية الجُزَيئية ببعض المزايا مقارنة بالبُنى القائمة على أنصاف النواقل، منها التكلفة المنخفضة والوزن الخفيف، إضافة إلى بضعة جوانب ذات صلة بالسميّة والبيئة. إلا أن مردودها حتى الآن ما زال أقلّ كثيراً. وهذا صحيح بسبب الالتقاط غير الكفء لضوء الشمس، وبسبب فقد الطاقة والقصور في التحوُّل من الحالات المتهيِّجة إلى حالة الإلكترون والثقب

المنفصلين اللذين يتحدان في النهاية لتوليد التيار. ومع ذلك يبقى التركيب الضوئي الصنعي توجهاً بحثياً واعداً ونشطاً، شأنه في ذلك شأن خلايا أنصاف النواقل الشمسية وخلايا غريتسل المذكورة في الفصل الخامس. وفي الطريقة الهجينة لصنع المادة الكهرضوئية النانوية، يتحد جُزَيء عُضوي (الجُزيء الذي يمتص الضوء في البداية) مع قُطب نانوي البُنية مصنوع من ثنائي أكسيد التيتانيوم (نصف ناقل)، فتكون النتيجة فصل شِحنة ناجحاً. وهذه البُنية المهجَّنة من بُنية نانوية طرية (الجُزيء) وأخرى صلبة (نصف الناقل) هي وحدها التي يمكن أن توفِّر مزايا هائلة من حيث الاستقرار والكفاءة والتكلفة.



الشكل 9 ـ 1: استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة. لو أضيف مقدار الطاقة الشمسية الكلّي الذي يسقط على الولايات المتحدة في سنة واحدة إلى المخطط لبلغ طول الخط 400 قدم

سوف تبقى الطاقة الشمسية موضع اهتمام رئيسي في التِقانة النانوية لأن

مزايا الطاقة النظيفة المتجددة مُغرية من وجهات النظر الاقتصادية والسياسية والبيئية والاجتماعية. ولإيضاح تلك المزايا يمكن التعبير عنها عددياً إلى حد ما. فالطاقة الكليّة الموجودة في ضوء الشمس الذي يسقط سنوياً على الـ 48 ولاية المتجاورة من الولايات المتحدة الأميركية تساوي نحو 45000 كواد quads، ويساوي مقدار الطاقة الكليّة من جميع الأنواع التي استهلكتها الولايات المتحدة في عام 1997 نحو 94 كواداً، أي 0.2 في المئة من المتاح من الشمس. أما الكواد فهي واحدة طاقة كبيرة جداً، وتساوي تقريباً مليون مليار وحدة حرارة بريطانية BTU. يبين الشكل 9 ـ 1 أعداداً أخرى تخصّ الطاقة مقارنة بمقدار الاستهلاك من الطاقة الشمسية. لاحظ أن الولايات المتحدة هي منتِج ومستهلك رئيسي للطاقة، وأن جميع الطاقة المستهلكة في العالم تقريباً يأتي من الوقود الأُحفوري. وما زالت مصادر الطاقة المتجددة والطاقة النووية لا تمثِّل إلا جزءاً صغيراً من الاستهلاك، مع أنها يمكن أن تغذي كل شيء بسهولة. وهذا هو تحدٍّ رئيسي للتِقانة النانوية.

توليد الضوء

تهدف التطبيقات الكهرضوئية إلى استعمال ضوء الشمس في إنتاج طاقة كيميائية أو كهربائية. أما في سيرورات إصدار الضوء فيحصل العكس تماماً: تُستعمل طاقة كيميائية أو كهربائية لتوليد ضوء. ثمّة في الطبيعة كثير من الأمثلة على توليد الضوء، ومنها جراثيم ومتعضّيات متلألئة من قبيل اليراعة (ذبابة الليل) التي تستعمل بُنى جُزَيئية معيّنة لتوليد الضوء.

من المعلوم أن ضوء المصباح الحراري الكهربائي وضوء الفلورسانت هما الشائعان منذ قرن تقريباً. في الضوء الإشعاعي، تتهيَّج الجُزَيئات باصطدامها مع الإلكترونات التي تمر عبر أنبوب الفلورسانت، فتتلألأ تلك الجُزَيئات المتهيِّجة بنفس الطريقة التي تتلألأ بها اليراعة. أما في حالة ضوء المصباح الحراري فيجري تسخين سلك إلى درجة حرارة عالية جداً، فيشعّ ضوءاً وحرارة (تتبدد الطاقة الحرارية، وهي بالتأكيد غير مرغوب فيها، خاصة من قبل الأشخاص الذين يمشطون شعرهم بالقرب من مصباح مكشوف).

لقد دخل علم النانو حقل إصدار الضوء إلى حد كبير من باب ما يُسمّى الثنائيات المشعّة للضوء light emitting diodes (LEDs). والثنائي المشعّ للضوء هو تماماً المقابل للخلِيّة الكهرضوئية. ففي الثنائيات المشعة للضوء تتحد

حوامل الشِحنة المتعاكسة، أي الإلكترونات والثقوب، لتكوين حالة متهيِّجة، فتبدِّد الحالة المحايدة كهربائياً حينئذ طاقتها بإصدار ضوء. تشابه هذه السيرورة الأخيرة جداً ما يحصل في الأنبوب الفلورسانتي، إلا أن طريقة تهييج الجُزَيئات مختلفة تماماً. في ضوء الفلورسانت، تتهيَّج الجُزَيئات بالتصادم مع الجُسيْمات المتحركة بسرعة. أما في الثنائيات المشعّة للضوء فتتهيَّج باتحاد شِحنتي الإلكترون والثقب الذي يوفِّر ما يكفي من الطاقة لتهييج الجُزَيء أو نصف الناقل محلياً، فتشعّ حينئذٍ البُنية المتهيِّجة ضوءاً مرئياً أو تحت أحمر (مع تبديد حرارة أقل كثيراً).

يقوم معظم الثنائيات المشعّة للضوء على أنصاف النواقل، شأنها في ذلك شأن الخلايا الكهرضوئية. والمزايا النسبية لأنصاف النواقل والبُنى الجُزَيئية من حيث إصدار الضوء هي نفس المزايا الموجودة في الخلايا الكهرضوئية. إلا أن مردود التجهيزات الجُزَيئية ما زال أخفض كثيراً من مردود أنصاف النواقل. لكنّ مزايا البُنى الجُزَيئية، ومنها الأمان البيئي والتكلفة، جعلت النهجين (والنهج الهجين منهما) موضع بحث نشط. ووفقاً لما ذكرناه في الفصل الخامس، ابتكر تشينغ تانغ ومجموعته لدى كوداك الثنائيات الجُزَيئية. أما تقليصها إلى السلَّم النانوي فهو ما يقوم به توبين ماركس Tobin Marks وسِنغ C. T. Ho Seng ومجموعتاهما لدى جامعة نورثِوسترن.

ويُعدُّ استعمال التلألؤ أيضاً ذا أهمية عالية في عدد من التطبيقات. على سبيل المثال، ثمة بُنى متلألئة متوفّرة للرماز القضباني. وهي تتكوَّن من مواقع متعددة على طول بُنية نانوية موسَّعة تتلألأ انتقائياً حين استجابتها لإشارة معيّنة. ويمكن استعمال هذا الرماز القضباني مُجِسّات ولصيقات أيضاً.

وقد بيَّن عملٌ حديث قامت به مجموعة تشارلز ليبرز في هارفارد أن الأسلاك المتقاطعة المصنوعة من أنصاف نواقل بمقاسات نانوية يمكن أن تكون بُنى مشعّة للضوء. ولعل هذه المشعّات ذات الأسلاك المتقاطعة هي أصغر منابع الضوء الحالية. فهي كثيفة، ويمكن اختيار ألوانها. وهي إلى جانب بقية الثنائيات المشعة للضوء واعدة جداً لتطبيقات تمتد من إنارة كاملة للغرفة حتى الشاشات الفائقة الميْز. وقد بدأت بُنى الثنائيات المشعة للضوء عالية الكفاءة وعالية الميْز وشديدة السطوع المستعملة في الشاشات المسطحة بالظهور في مجالات متخصصة من قبيل منظومات الرؤية العسكرية وشاشات الهواتف الخلوية،

وحتى وسائل التحكم على واجهة السائق في السيارات. إن الثنائيات المشعة للضوء والخلايا الكهرضوئية من أكثر التطبيقات إغراء للبُنى النانوية.

نقل الضوء

إن الاتصالات بالغة الأهمية لمجتمعنا. قبل 30 سنة لم تكن ثمة هواتف خلوية وإنترنت وشبكة عنكبوتية عالمية وخطوط اتصالات رخيصة بعيدة المدى (وكانت أسواق الاتصالات أقلّ كثيراً). أما الآن فقد جعلت شبكات الاتصالات عالية الأداء العالمَ يبدو أصغر وأكثر حميمِيّة، وأقلّ عدوانية (من وجهة نظر متفائلة).

تتضمّن جميع الاتصالات الحديثة تقريباً نقل رسائل باستعمال أجزاء مختلفة من الطيف الكهرمغنطيسي. فثمة محطات راديوية للموجات الطويلة، وأبراج للأمواج القصيرة والمكروية، واتصالات ضوئية ذات أمواج شديدة القصر. وكانت الألياف الضوئية واحدة من أوجه النجاح التقاني الحقيقي التي تحققت في العقدين السابقين. تتيح الألياف الضوئية نقل إشارات هائلة الكثافة بسرعة وكفاءة ووثوقية عالية. ويستطيع ليف واحد أن يحمل عشرات الآلاف من تيارات البيانات والمكالمات الصوتية في الوقت نفسه. ولم تصل سرعات النقل على تلك الألياف إلى أي حد يقيِّدها، بل إن سعتها محكومة بسعة الإلكترونيات الموجودة في نهاياتها.

وكان للعلم والتِقانة النانويين دور فعّال في إنتاج بُنى ألياف ضوئية عالية الكفاءة. ويُعتبر كَبْل الليف الضوئي من الناحية العملية بُنية معقدة إلى حد ما لأن مادة القوقعة الداخلِيّة يجب أن تختلف عن مادة التغليف كي تمر الإشارة في الليف دون كثير من البعثرة أو الإعاقة على المسافات الطويلة (التي تصل الآن إلى آلاف الأميال من دون الحاجة إلى مُضخِّمات أو مُعيدات خارجية). والليف الداخلي ذاته يجب أن يكون خالياً من مُسَبّبات ضياع الإشارة، أي عدم التجانس والتشقق وعدم النقاء، بقدر الإمكان، حتى إنه يمكن إشابته ببُنى نانوية لمنع الإشارات من الاضمحلال. ويمكن جعل الإشارات مستقطبة ببُنى نانوية لتحقيق مزج أفضل. ونظراً إلى أن الضوء يمكن أن يتبعثر بجُسيْمات صغيرة نسبياً، فإن الطرائق التركيبية لتقليص الشوائب في الألياف الضوئية تمثِّل طموحاً صناعياً رئيسياً. والتِقانة النانوية تتناول كل هذه المشاكل لمعالجتها.

التحكُّم في الضوء واستعماله

في التقانات الحالية التي تنقل المعلومات على الألياف الضوئية من الضروري تحويل المعلومات من إشارات ضوئية إلى إلكترونية بُغية توجيهها وتبديل مساراتها ومعالجتها. لكنْ إذا أمكن بناء المكوِّنات الضوئية بحيث توجِّه وتضخِّم وتبدِّل وتعدِّل الإشارات الضوئية أمكن حينئذ بناء منظومة اتصالات ضوئية صرفة. أكثر من ذلك، يمكننا أن نتخيَّل منظومة حَوْسَبة كاملة قائمة على الضوء فقط. في تلك المنظومة يمكن للحاسوب الضوئي أن يخزّن معلومات على أقراص ضوئية أو في بلّورات هولوغرافية أو ضوئية، ويجري حينئذ تداول البيانات وإجراء الحسابات الفعلية باستعمال الضوء بدلاً من الإلكترونات.

لكن العقبة هنا تكمن في بناء تجهيزات بصرية صغيرة (نانوية المقاسات من الناحية المثالية) تمكِّن عملياً من تداول الإشارات الضوئية. فالموادّ يجب أن تتصف بخواصّ معيّنة للتمكين من التبديل الضوئي، أي التحكُّم في الضوء بالضوء. وقد جرى التنبُّؤ بهذه الموادّ واستعراضها في خمسينيات القرن العشرين تقريباً، لكن الصعوبة الحالية، المتجلّية في ما يُسمّى البُنى اللاخطّية البصرية، هي أن كفاءاتها منخفضة جداً وأن مقاساتها المميِّزة ما زالت كبيرة جداً. ووفقاً لما سوف نراه أثناء مناقشتنا للإلكترونيات في هذا الفصل فإن قانون مور يدفع المكوِّنات الحاسوبية الإلكترونية إلى السلَّم النانوي بسرعة كبيرة، في حين أن معظم المبدّلات الضوئية ما زال كبيراً بقدر يكفي لرؤيتها بالعين المجرّدة تحت ضوء القمر.

ووفقاً لما رأيناه مرّات عديدة، يمكن للموادّ الملائمة للتجهيزات البصرية أن تقوم على أنصاف النواقل أو على كينونات جُزَيئية. أما أفضل أداء يمكن الحصول عليه اليوم للبصريات اللاخطية فهو ذاك الذي تتصف به الموادّ المتبلورة، وخاصة تلك القائمة على نيوبات الليثيوم lithium niobate. وهذه هي تجهيزات أُحادية البلّورة single-crystal، ولذا فهي هشّة وتُعاني بعض صعوبات التجميع. ومع ذلك فإن تجهيزات التعديل الضوئي القائمة على نيوبات الليثيوم تُستعمل حالياً في عدد من المنظومات البصرية، وتصغير هذه البُنى يجري سريعاً وعلى قدم وساق.

وللأسباب المعتادة من حيث التجميع والتكلفة والحجم والأمان، تستحوذ البُنى الجُزَيئية القائمة على الموادّ البصرية اللاخطية على اهتمام هائل، إلا أنها

ما زالت حتى الآن مجالاً آخر لا يرقى فيه أداء الأجناس الجُزَيئية إلى أداء أنصاف النواقل. وما يُسمّى بالموادّ البصرية اللاخطية من المرتبة الثالثة يُعدُّ ضرورياً لتصبح الحَوْسَبة الضوئية والتداول الضوئي للبيانات واقعيين من حيث المبدأ. وفي هذا المجال لم تصل تِقانة أنصاف النواقل، ولا التِقانة الجُزَيئية، إلى نقطة تكون فيها التجهيزات عملية. وينجم هذا الافتقار إلى الكفاءة عن طبيعة استجابة الموادّ البصرية اللاخطية التي تعتمد على شدة ضوء حُزمتين، أو ثلاث أو أربع حُزَم واردة. ونظراً إلى أن التفاعل بين المادة والضوء ضعيف نسبياً من حيث الأصل فإن الاستجابة لعدّة حزم في الوقت نفسه أمر ضيئل الاحتمال. لذا فإن استجابة الموادّ البصرية اللاخطية تتصف بالضعف وعدم الكفاءة. لكنْ ثمة طرائق وفيرة لدى الباحثين لتحسين الحالة، وهذا مجال آخر ممتلئ بالتحديات والتطبيقات الممكنة.

لا يعاني النقل والتبديل الضوئيان ما تعانيه العمليات الإلكترونية المشابهة، لأن الفوتونات التي تحمل الضوء لا تمتلك شِحنة. فنظراً إلى أن الإلكترونات تمتلك شِحنة، يمكنها أن تتفاعل مع الشوارد المشحونة أثناء حركتها عبر الأسلاك. إن هذه التفاعلات ضعيفة نسبياً، ويمكن للنقل عبر المعادن المثالية أن يكون عالي الكفاءة. لكن عندما تكون المعادن أقل نقاء، أو تحتوي على عيوب بنيوية، فإن الإلكترونات تتحرك بكفاءة أقل وتتبعثر، مبددة طاقة على شكل حرارة في المادة. يمكن لهذا التسخين الناجم عن المقاومة أن يكون مفيداً في تطبيقات من قبيل شيّ الخبز مثلاً. أما في الدارات الإلكترونية فيؤدي التسخين الناجم عن المقاومة إلى تبديد الطاقة وضياعها، وأحياناً إلى إخفاق كارثي. وكل شخص يستعمل حاسوباً محمولاً على ركبتيه وهما عاريتان يُدرك المشكلة الساخنة المتجلية في ضياع الطاقة الناجم عن المقاومة. يُضاف إلى ذلك أن التجهيزات الإلكترونية ذات الترددات العالية، ومن أمثلتها الشبكات الحاسوبية والمعالِجات الصغرية تواجه مشكلة التحريض الذاتي والمتبادل: فالدارات يمكن أن تعمل مثل الهوائيات، ويمكن للإشارات القفز من سلك إلى آخر عندما تكون الترددات عالية والمسافة بين الأسلاك قصيرة. يُقلِّص جعل الأسلاك محورية أو مجدولة هذه المشكلة في تقانات الشبكات الحاسوبية التي من قبيل الإثرنت، إلا أنه ليس ثمة من تِقانة لتحقيق ذلك ضمن دارة متكاملة. ومع ازدياد تردد ساعة الشريحة المكروية وكثافتها تتحوَّل مشكلتا التحريض والتسخين الناجمتان عن المقاومة إلى عقبات أساسية. أما الحواسيب

والتجهيزات الضوئية فهي منيعة تقريباً على هاتين المشكلتين لأنها لا تستعمل الشحنات الكهربائية. وهذه واحدة من مزايا إشارات الدارات الضوئية.

الإلكترونيّات

تمثِّل الإلكترونيّات اليوم التِقانة الأساسية للحَوْسَبة والاتصالات، والمكوِّنات الرئيسية للسلع الاستهلاكية أيضاً. صحيحٌ أن قِلّة منا متقدمون في السنّ بما يكفي لتذكُّر أجهزة الراديو البلّورية crystal radio(*)، إلا أن بعضنا يتذكَّر أيضاً إلكترونيات الصمامات المخلاَّة. حينما تحدَّثنا أول مرة عن اختراع الترانزستور ثم عن الدارات المتكاملة وتصنيع الشرائح السليكونية جزمنا بأنها تمثِّل قوى اقتصادية واجتماعية وتِقانية عظيمة، وأن تطويرها أدّى إلى تطبيقات متقدمة تقانياً هيمنت على التقدم التجاري والصناعي في العالم المتطور في الثلث الأخير من القرن العشرين. ويستمر التطوير الجاري للإلكترونيات بتوفير مزايا هائلة من الناحيتين المالية والمعيشية. وقلنا أيضاً إنه من غير المرجَّح أن نستمر بمعدَّل تقدُّمنا الحالي في تطوير الإلكترونيات ما لم تكن ثمة ثورة تقانية كبرى في طريقة عمل الإلكترونيات وصنعها، وأنه يمكن لتلك الثورة أن تحصل بواسطة التِقانة النانوية.

بغية التركيز، سوف نقصر مناقشتنا للإلكترونيات على البُنى القائمة على الشرائح في المقام الأول، لأن التقانات الحالية المحيطة بها هي أكثر التقانات تسارعاً في اتجاه الوصول إلى أقصى حدودها. وسوف نقول شيئاً أيضاً عن بُنى الذواكر والتوصيلات اللازمة للحَوْسَبة ذات الكفاءة العالية. وبتوجُّهنا هذا نكون قد اخترنا عن عمد إهمال التطبيقات الهائلة للإلكترونيات النانوية في كثير من أسواق الاتصالات والاستهلاك، وفي غيرها من المجالات الممتدة من الرادارات إلى الراديو ومسيِّرات البيانات. وبُغية البقاء ضمن أغراض هذا الكتاب، سوف نسلِّط الضوء على أكثر المجالات تحدِّياً ووعداً. فوفقاً لما سبق أن أكَّدناه سوف يعمّ العلم والتِقانة النانويان جميع مناحي حياتنا على مدى عدة العقود القادمة.

حين النظر أول وهلة إلى منحني قانون مور المبيّن في الشكل 2 ـ 4 فإنه

(*) جهاز استقبال راديوي شديد البساطة عُرِف في أيام الراديو الأولى، وهو لا يحتاج إلى تغذية كهربائية، بل يستمد طاقته من الإشارة الراديوية نفسها (المترجم).

يبدو ناعماً، وهذا يوحي بأن تطورات الإلكترونيات كانت مستمرة، مع أنها كانت في الواقع متقطعة. فقد جرى تطوير عدد كبير من التحسينات على أيدي مهندسين مبدعين، وهذا ما جعل تلك التِقانة القائمة على الشرائح أرخص وأكثف وأعلى كفاءة. إلا أن ثمة عدة مشكلات جوهرية تنطوي على وجود سد منيع سوف يحول دون استمرار هذه التطويرات. وسوف ينجم هذا السد عن بعض الحدود الفيزيائية الجوهرية المتعلقة بطبيعة النقل الكهربائي وبضرورة أن الترانزستور يجب أن يكون قادراً على الوصل والفصل بواسطة جهد يُطبَّق على طرفي بوّابته. لكن حينما يُصبح الترانزستور صغيراً جداً، فإن تسرّب الإلكترون الناجم عن مفاعيل الميكانيك الكمّومي عبر الترانزستور سوف يعني أنه لن يكون واضحاً إنْ كان في حالة وصل أم فصل. وهذا سوف يستدعي البحث عن طرائق منطقية جديدة كلياً، أو حتى عن بُنى نانوية مختلفة.

لقد وصلت التِقانة المتقدمة في صناعة أنصاف النواقل فعلاً إلى السلَّم النانوي. فقد أصبحت تِقانة الـ 130 نانومتراً شائعة في الشرائح الحالية، وأصبحت النماذج الأولية المتقدمة ذات المقاسات المقلَّصة جداً متاحة. لكنْ وفقاً لما أشرنا إليه سابقاً فإن صنع الأشياء الصغيرة في السلَّم النانوي باستعمال تقنيات الطباعة الضوئية ذات النهج النزولي الذي تستعمله اليوم كل مرافق تصنيع أنصاف النواقل يدفع التكاليف نحو الأعلى بمعدَّل أُسِّي. وعلى ضوء هذا الازدياد في التكلفة، والتسامحات الكبيرة نسبياً التي يتطلّبها استمرار قانون مور، تصبح طرائق الإلكترونيات الأخرى أكثر إغراء.

أنابيب الكربون النانوية

ورد ذكر بُنية أنبوب الكربون النانوي في ما سبق عدّة مرّات لأنها تمثِّل صيغة جديدة كلّياً من المادة. يمكن للأنابيب النانوية أُحادية الجدار أن تكون نصف ناقلة أو ناقلة. والأنابيب النانوية قاسية جداً أيضاً ومستقرة جداً، ويمكن بناؤها بحيث تتجاوز نسبة طولها إلى سماكتها آلاف المرّات.

ويمكن للأنابيب النانوية أن تتصف بسلوك مثير جداً للاهتمام. وقد استعرض علماء من قبيل سيز دكَّر Cees Dekker في جامعة دلفت، وبول ماكْ أُوين Paul McEuen في جامعة كورنلّ، وفيدون أفوريس لدى IBM، وتشارلز ليبر في جامعة هارفارد أن الأنابيب النانوية الأُحادية يمكن أن تعمل كالترانزستورات. وقد أُثبت أن أزواج الأنابيب النانوية، أو الأنابيب النانوية

المتقاطعة، يمكن أن تعمل كالبُنى المنطقية. وتمثِّل هذه التجارب برهاناً على مبدأ أن منطق الأنابيب النانوية، عند سلَّم غير مسبوق في الصغر، يمكن أن يوفِّر فعلاً وسيلة للحَوْسَبة.

إن علم الأنابيب النانوية الأساسي مثير جداً، وهو محور كثير من الجهود الأكاديمية الرئيسية في التِقانة النانوية القائمة على أنابيب الكربون النانوية. وأفضل تلك الجهود تحصل في جامعات رايس وهارفارد وكورنلّ ونورثوِسترن وتسوكوبا ودلفت وطوكيو وستانفورد وجورجيا التقانية وإلِّينوي ونورث كارولينا الحكومية وكاليفورنيا التقانية. وقد تجلّت إحدى صعوبات الأنابيب النانوية الرئيسية في تجميعها مادياً. فنظراً إلى أنها تنزع إلى الالتصاق معاً، وإلى أنها لا تتصف بخواصّ التعرُّف الجُزَيئي التي تتصف بها عموماً الجُزَيئات العضوية، فإن تدوالها باستعمال تقنيات صعودية دون الاستعانة بالتعرُّف الجُزَيئي يمثِّل تحدياً كبيراً. لذا فإن البُنى الهجينة، الواقعة بين الأنابيب النانوية ذات الخواص الفيزيائية والكهربائية الجيدة، والجُزَيئات الطريّة ذات خواصّ التجميع والتعرُّف الجيدة، تمثِّل سبيلاً مغرياً لبناء تجهيزات إلكترونية تقوم على وظائف الأنابيب النانوية.

الإلكترونيّات الجُزَيئيّة الطريّة

يوفِّر استعمال الجُزَيئات العضوية أو المعدنية العضوية الشائعة مكوِّناتٍ إلكترونية بعض المزايا المغرية مقارنة باستعمال الأنابيب النانوية، ومنها سهولة التجميع نسبياً (وإمكان التجميع الذاتي)، وبعض خصائص التحكُّم والتعرُّف (والتعرُّف الحيوي) التي تسمح بها الجُزَيئات. ومع أن معظم الجُزَيئات العضوية هي عوازل طريّة، ومنها الشمع والبوليستيرين والقطران وأظفار الأصابع، فإنها تستطيع نقل الكهرباء ضمن ظروف معيّنة. ويمكن بالفعل التحكُّم في نقل التيار الكهربائي في الجُزَيئات إمّا كيميائياً أو بالحقول الكهرمغنطيسية.

وقاد ظهور مجاهر المسح النفقي المذكورة في الفصل الرابع إلى اهتمام ونشاط متناميين في مجال الإلكترونيات الجُزَيئية. فخلال العامين الماضيين أوضح العلماء أن الجُزَيئات المنفصلة يمكن أن تقوم بالتبديل مثل الترانزستور، وأن مرور التيار فيها لا يسبّب تبديداً للطاقة (وهذا في المحصِّلة شكل من الناقلية الفائقة، لكنْ بآلية مختلفة، لم يُرَ سابقاً في الدارات المتكاملة الشائعة بكل مقاساتها)، وأن البُنى النانوية يمكن أن تكون نواقل فائقة حقيقية، وأنه

يمكن استعمال الجُزَيئات مبدِّلات وقواطع فعالة في الدارات الإلكترونية. وقد أكَّدت هذه المجموعة من الاكتشافات المرموقة من جديد إمكان استعمال الجُزَيئات مكوِّنات للتجهيزات الإلكترونية. وتمتد هذه التطبيقات من التوصيلات أو الأسلاك الجُزَيئية ضمن القواطع الجُزَيئية حتى المجمِّعات والذواكر الجُزَيئية. وهذا ما يؤدّي إلى تصميم أشدّ الحواسيب الممكنة كثافة باستعمال البنيانات الحاسوبية الحالية. إلا أن تجميع هذه التجهيزات بكفاءة يمثِّل الآن أعظم تحدٍّ للإلكترونيات الجُزَيئية.

الذواكر

حين بناء حاسوب أو أي تجهيزة إلكترونية أخرى من المهم خزن المعلومات على أساس مؤقّت أو طويل الأجل. تُخزن المعلومات في الذواكر التي استُعملت أنواع مختلفة منها منذ ظهور ذواكر النوى المغنطيسية الأولى. وبالفعل تحسَّنت إمكانات الذاكرة، أي ازداد مقدار المعلومات التي يمكن خزنها في حيِّز مُعيَّن، بسرعة تفوق ما تنبَّأ به قانون مور بخصوص كثافة الترانزستورات.

وآخر ما تُوُصِّل إليه من الذواكر حالياً هي الأقراص الصلبة التي تقوم على المغنطة: تُخزن المعلومات على شكل استقطابات مغنطيسية على قُرص، وتكتب عليه وتُقرأ منه برأس خاص أثناء دوران القرص. تُسمّى الظاهرة التي تقوم عليها المغنطة هنا بالمقاومة المغنطيسية العملاقة giant magneto-resistance، ويُقصد بها مفعول الحقول المغنطيسية في المقاومة الكهربائية. فاعتماداً على الاستقطاب المغنطيسي (كون البت 1 أو 0) يختلف التيار الذي سوف يقرأه الرأس. لقد جعلت ظاهرة المقاومة المغنطيسية العملاقة صناعة الأقراص الصلبة صناعة كبرى تبلغ عوائدها نحو 40 مليار دولار سنوياً.

وباستعمال البُنى النانوية من الممكن تقليص حيِّز خزن البت الواحدة تقليصاً هائلاً، ومن ثَمَّ زيادة كثافة الذاكرة المغنطيسية وكفاءتها وتخفيض تكلفتها. يُعتبر عمل كريس مورّاي Chris Murray لدى IBM (انظر الفصل الخامس) نموذجاً لأفضل بحث أُجري في هذا المجال. تُخزن البتات وفقاً لطريقة مورّاي على شكل نقاط نانوية مغنطيسية، ويمكن جعل هذه النقاط دقيقة جداً بتقليص مقاساتها حتى تبلغ ما يُسمّى حدّ المغنطيسية المسايرة الفائق. أما عند المقاسات التي تقل عن ذلك فلا يكون الخزن المغنطيسي مستقراً، ويمكن

للضجيج الحراري أن يتداخل معه. لذا يمثِّل حد المغنطيسية المسايرة الفائق أصغر بُنية ممكنة للذاكرة المغنطيسية.

تُستعمل طرائق الطباعة النانوية، التي ناقشناها بالتفصيل في الفصلين الرابع والخامس، في تحضير ذواكر ذات مقدرة مدهشة. على سبيل المثال، باستعمال طريقة طباعة طرية من قبيل الطباعة النانوية بالقلم الغاطس والطباعة بالتماس النانوي أو الطباعة بالتغذية الراجعة المتحكَّم فيها، من الممكن تقليص مقاسات الأشكال الإفرادية حتى بضعة نانومترات. فإذا احتوت كل نقطة من هذه النقاط على بت واحدة من المعلومات (1 أو 0)، وإذا كانت المسافات الفاصلة بينها تساوي عشرة أمثال مقاس النقطة الواحدة، أمكن بسهولة خزن 100000 مجموعة من الموسوعة البريطانية على ذاكرة بحجم الصفحة التي تقرؤها حالياً.

ويوفِّر العلم والتِقانة النانويان إمكانات متنوعة للذاكرة. على سبيل المثال، لا تمثِّل الموادّ الكاسرة للضوء التي ناقشناها في الفصل الخامس إلاّ نوعاً واحداً فقط من الذواكر الضوئية. فالأقراص المتراصّة (CD) وأقراص الفيديو الرقمي (DVD) التي تُستعمل لتسجيل الموسيقى والأفلام تستعمل أيضاً التِقانة البصرية التي تحصل فيها القراءة بالليزر.

والذواكر المغنطيسية والضوئية الحالية هي بُنى ثنائية الأبعاد إلى حد كبير، فهي تقوم على بُنى مسطّحة. والذواكر الهولوغرافية والكاسرة للضوء تقوم على التأثيرات المتبادلة بين الضوء والمادة، وتُخزن المعلومات فيها بتغيير الحالات الجُزَيئية بواسطة حقول ليزرية شديدة جداً. تُستعمل الليزرات لكتابة المعلومات في الذاكرة، أي المعلومات التي يمكن تغييرها بمزيد من الإشعاع الليزري عالي الشدة، أو التي تُمكِن قراءتها بضوء منخفض الشدة. وإحدى المزايا المذهلة لهذه البُنى البصرية النانوية هي أنها يمكن أن تصنع بثلاثة أبعاد، لأن ما يمكن أن يُقرأ ليس سطح المادة فحسب، بل جسمها أيضاً. وهذا يمكن أن يعطي ذواكر بصرية ذات كفاءات وإمكانات خزن عالية جداً.

لذا يمكن أن نرى أن ثمة مزايا لاستعمال البصريات بدلاً من الإلكترونيات في الذواكر، شأنها في ذلك شأن تجهيزات المنطق والحَوْسَبة. ومرة أخرى، فإن المشكلة حتى الآن هي أن هذه التقنيات البصرية البالغة التعقيد تتطلب خواصّ موادّ وإمكانات صناعية ما زالت غير موثوقة. وسوف يكون تطوير موادّ بصرية لاستعمالها في الذواكر أسهل من تلك اللازمة لتجهيزات التبديل لأن

تصنيعها والقراءة منها يعتمدان على سيرورتين خطيتين، أي متناسبتين مع شدة حُزمة ضوء واحدة. والذواكر الضوئية التي هي قيد الاستعمال حالياً سوف تُطوَّر في السلَّم النانوي قبل أي بُنية منطقية بصرية نانوية حقاً، مع أن كل التجهيزات النانوية سوف توفّر سعات تزداد أُسِّياً إذا عملت في الأبعاد الثلاثة.

واقتُرحت طرائق أخرى لصنع ذواكر ذات سعات كبيرة جداً في مجال الإلكترونيات الجُزَيئية. لقد ناقشنا ذواكر الدنا في مؤطَّر الحَوْسَبة بالدنا في الفصل الخامس، ورأينا أن الطبيعة تستعمل الدنا لخزن معلوماتها الجينية، وأنه يمكن أيضاً خزن المعلومات الحاسوبية في بُنية الدنا. لكن ثمة عدة مشاكل تعترض ذلك، منها السرعة وطريقة القراءة والكتابة ورهافة بُنية الدنا التي تمنع تكوينها باستعمال أي تقنية للطباعة بطريقة واضحة. ومع ذلك فإن الحصول على ذاكرة موثوقة رخيصة وكبيرة السعة تقوم على الدنا، إضافة إلى حَوْسَبة بالدنا شديدة التوازي، سوف يجعلان هذا الحقل على درجة بالغة من الأهمية.

وفي ما يخصّ الذواكر العادية والحَوْسَبة الكمّومية تُعتبر النواقل الجُزَيئية على درجة بالغة الأهمية أيضاً. وعلى وجه الخصوص، يمكن للبُنية المسمّاة بصِمام التدويم المغنطيسي magnetic spin valve أن تُستعمل لمكاملة حركة الإلكترونات ضمن البُنى الجُزَيئية مع الذاكرة. في هذه البنى تعتمد المقدرة على تمرير تيار إلكترونات عبر الجُزَيء على تدويم الإلكترونات (أتذكُر التدويم الذي ناقشناه في مؤطَّر الحَوْسَبة الكمّومية في الفصل الخامس). بتغيير البُنية الجُزَيئية المحلية من الممكن السماح لشِحنة ذات تدويم مُعيَّن بالمرور، في حين أن الشِحنة ذات التدويم المعاكس تُمنع من المرور. وقد لاحظ هذا النقل الإلكتروني الذي يعتمد على التدويم كل من مجموعتي كورنلّ (هكتور أبرونا Hector Abruòa وبول ماكْ أُوين ودان رالف Dan Ralph) وهونغكون بارك Hongkun Park في جامعة هارفارد. وبيَّنت مجموعة رون نامان Ron Naaman في معهد وايزمان في إسرائيل مقدرة الجُزَيئات الإفرادية على القيام بكثير من المهام، ومنها إمكانات النقل التفاضلي للإلكترونات متعاكسة الاستقطاب. ويمكن لهذه التطورات أن تؤدي إلى ذواكر تُخزن فيها البت الواحدة على جُزَيء واحد.

البوّابات والقواطع

يقوم تصميم الحواسيب المألوفة والإلكترونيات المكروية على استعمال ترانزستور المفعول الحقليfield effect transistor، وهو مبدال (فاصل واصل)

بسيط يمكن تبديل حالته بين الوصل والفصل بتطبيق جهد كهربائي على مدخل التحكُّم فيه (أي على بوّابته). وبتجميع هذه المبدالات الترانزستورية معاً يمكن تكوين بُنى منطقية أعقد تُسمّى البوّابات المنطقية logic gates (لا علاقة لها ببوّابة ترانزستور المفعول الحقلي، أو ببل غيتس Bill Gates الذي يخرج عن المنطق أحياناً. تُعرف البوّابات المنطقية أيضاً ببوّابات المنطق البولياني، تخليداً لجورج بول George Boole، الرياضي الإنكليزي الذي عاش في القرن التاسع عشر). تستطيع البوّابات المنطقية تنفيذ توابع منطقية متنوّعة لإشارات دخلها، ومن تلك التوابع التقاطع AND والاجتماع OR والنفي NOT. وبضمّ البوّابات المنطقية إلى تجهيزات الذاكرة يمكننا بناء المعالِجات وجميع الأجزاء الداخلِيّة لمنظومة حاسوب حديثة. ولهذا السبب تبقى الترانزستورات في صميم الحَوْسَبة الرقمية. وقد سبق أن أشرنا في مناقشتنا للأنابيب النانوية أن البُنى النانوية يمكن أن تعمل كالترانزستور، وأكَّدنا أهمية العمل الذي يُبَيِّن أن الجُزَيئات الإفرادية يمكن أن تعمل مثل ترانزستور المفعول الحقلي، لكنْ بمقاسات تقل بمئة مرة عن مقاسات تلك التي توفِّرها تقنيات الطباعة الحالية على السليكون.

يكون الترانزستور عادة في حالة معيّنة وفاصلا أو واصلاً (يعتمد نوع الحالة على نوع الترانزستور). ويتطلب نقله إلى الحالة الثانية تطبيق جهد كهربائي على بوّابته، ويجب أن يبقى ذلك الجهد على البوّابة ما بقيت الحاجة إلى الحالة الثانية قائمة. وحين إزالة الجهد يعود الترانزستور إلى حالته الأولى. يشابه هذا مطحنة القهوة التي عليك ضغط زرّها طوال مدة الطحن التي ترغب فيها. وثمة مكوِّنات أخرى، تُسمّى المِبْدالات، تبقى مستقرة في أي من الحالتين. فهي تبقى في حالة وصل إلى أن تُقلب إلى حالة الفصل، وتبقى في حالة الفصل إلى أن تُقلب إلى حالة الوصل. ولا حاجة إلى تطبيق جهد على دخلها إلا حين الرغبة في نقلها من إحدى الحالتين إلى الأخرى. وتوصف هذه الخاصّية بأنها ثنائية الاستقرار bistable.

لقد استُعملت البُنى الجُزَيئية لتوفير وظائف الفصل والوصل اعتماداً على مفهوم حالاتها الديناميكية، حيث يمكن للجُزَيئات التي تمتلك نفس المقدرة على الارتباط أن تكون لها بُنيتان ماديتان مختلفتان، على غرار شكلَي المظلّة في حالتي الفتح والطيّ. وقد بيَّن التعاون القائم بين مجموعتي جيم هيث Jim Heath وفرازر ستودارت Fraser Stoddart لدى جامعة كاليفورنيا بلوس أنجلوس، ومجموعة ستان وليامز Stan Williams لدى شركة HP، أنه يمكن

استعمال جُزَيئات تُسمّى الروتاكسانات rotaxanes لفصل أو وصل تيار يمر عبر سلك جُزَيئي في صفيفة من البوّابات المنطقية تستطيع عملياً أداء مهامّ حاسوبية.

البُنيانات

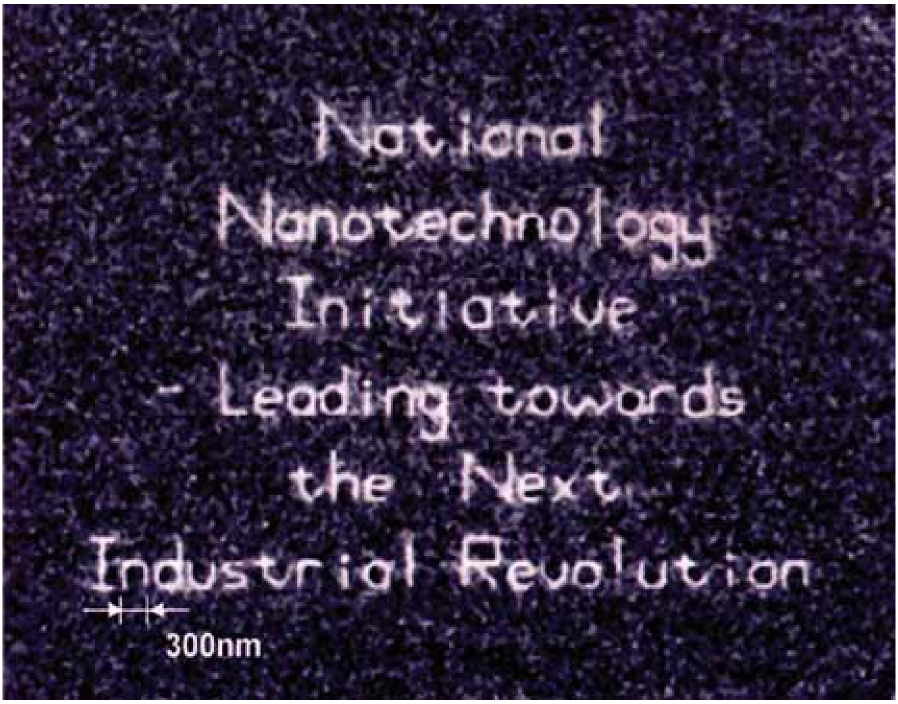
لو اقتصرت الحواسيب على الإجابة عن مجموعة محدودة جداً من الأسئلة فقط، من قبيل مقارنة قطعتين من المعلومات (كما يحصل في بوّابة منطقية)، أو كسر تعمية (كما في الحَوْسَبة الكمّومية)، أو البحث عن بيانات (كما في الحَوْسَبة في الدنا)، أو حتى حل مسائل رياضية معقدة (كما في الحَوْسَبة السربية)، لما كانت قد غيَّرت الحياة الحديثة. إن الحواسيب شاملة الأغراض، فهي تستطيع تشغيل إبريق القهوة في الصباح وحساب ضريبة الدخل (بالقدر الممكن)، وتوجيه طائرة عبر عاصفة رعدية، وتمكِّن المهندسين، من خلال أدوات التصميم بمساعدة الحاسوب، من تصميم منظومات معقدة. والتصميم العام للحاسوب، أي بُنيانه archetecture، هو ما يجعله ملائماً لتطبيق مُعيَّن أو يمنحه المقدرة على أن يُستعمل في تطبيقات كثيرة.

تتصف الحَوْسَبة الكمّومية والسربية والحَوْسَبة بالدنا بإمكانات كبيرة، إلا أن تطبيقاتها محدودة. فالبوّابات وحدها أبسط من أن تؤدي عملاً مفيداً، بقطع النظر عن سرعاتها العالية ومقاساتها الصغيرة وكفاءتها وتعقيدها. من ناحية أخرى، تستطيع التقانات التي ناقشناها في هذا الفصل، أي الحَوْسَبة الضوئية كلياً والإلكترونيات الجُزَيئية والدارات القائمة على الأنابيب النانوية، العمل باستعمال نفس التصاميم والبنيانات الأساسية المستعملة في الحواسيب الحالية، ويمكن أن تكون ذات أغراض عامة، وهذا ما يجعلها بدائل بسيطة للمنظومات الحالية.

ومن التطورات الكبرى التي سمحت لقانون مور بالاستمرار حتى الآن مقدرتنا المتزايدة، القائمة على الطباعة على السليكون، على وضع عدد كبير من البوّابات المنطقية وتوصيلها معاً لتكوين بُنيانات شديدة التعقيد لتحقيق حَوْسَبة رقمية عامة الأغراض. إلا أن القيود المتأصّلة في نهج الطباعة النزولي تضع حداً لأنواع البنيانات التي يمكن تطويرها باستعمال طرائق السيموس الحالية. فالدقة التي يمكن لشكل أن يتكرر بها تعتمد على طول موجة الضوء المستعمل في طباعة ذلك الشكل. فحتى الضوء البعيد في المجال فوق البنفسجي لا يقل طول موجته عن نحو 10 نانومترات. ويمكن استعمال الطباعة

بضوء ذي طول موجة أقصر، من قبيل الأشعة السينية، إلا أن هذه الأشعة تمتلك طاقة كبيرة (تتناسب الطاقة طرداً مع التردد وعكساً مع طول الموجة) يمكن أن تُتلف الموادّ أثناء تكوين الأشكال عليها. ويقتصر استعمال طباعة السيموس عموماً أيضاً على مستوٍ واحد أو سلسلة من المستويات.

ويمكن استعمال بعض طرائق الطباعة الدقيقة المذكورة في الفصلين الرابع والخامس، بالنهج الصعودي، لتكوين صفيفات معقدة من الأشكال الصغيرة بتكلفة منخفضة نسبياً مقارنة بتكلفة السيموس. ويجري حالياً في كثير من الأمكنة تطوير أنواع الطباعة تلك لتصبح قادرة على صنع البُنى الموسَّعة. إن استعمال الطباعة الدقيقة والبُنى الحاسوبية القائمة على الجُزَيئات يمثِّل تحدِّياً فكرياً وهندسياً كبيراً، إلا أن أناقة وقوة التصميم الصعودي، أي تجميع الأشياء من ذرّات وجُزَيئات منفصلة على غرار ما تفعله الطبيعة، يُعدُّ أحد أكثر الجوانب إثارة في علم النانو أو في أي علم حالي.

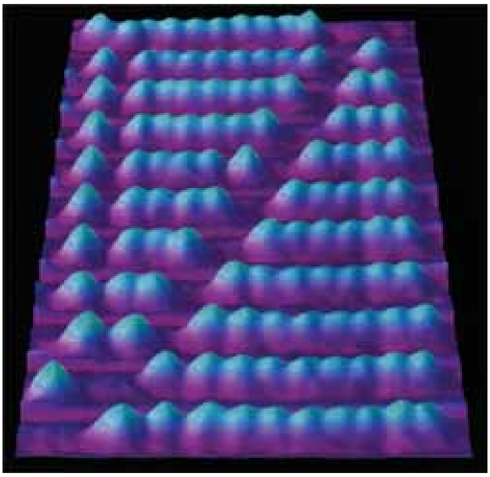


الشكل 1 ـ 1: صورة لبُنية نانوية تتضمن النص التالي: المبادرة القومية للتقانة النانوية التي سوف تؤدي إلى الثورة الصناعية التالية

اقتُبست الصورة بعد موافقة **مجموعة ميركين لدى جامعة نورثوسترن**.

الشكل 1 ـ 2: تبيّن هذه الصورة المقاسات في السلَّم النانوي مقارنة ببعض الأشياء المألوفة لنا. كل لوحة مكبَّرة بمقدار عشر مرّات من اللوحة التي تسبقها. ووفقاً لما تراه، يساوي فرق المَقاس بين النانومتر والشخص فرقَ المَقاس نفسه تقريباً بين الشخص ومدار القمر

الحقوق محفوظة لـ: *Lucia Eames/Eames Office* (www.eamesoffice.com).



الشكل 1 ـ 3: المِعداد النانوي. النتوءات المنفصلة هي جزيئات كربون ـ 60، وعرض كل منها يساوي نحو نانومتر واحد

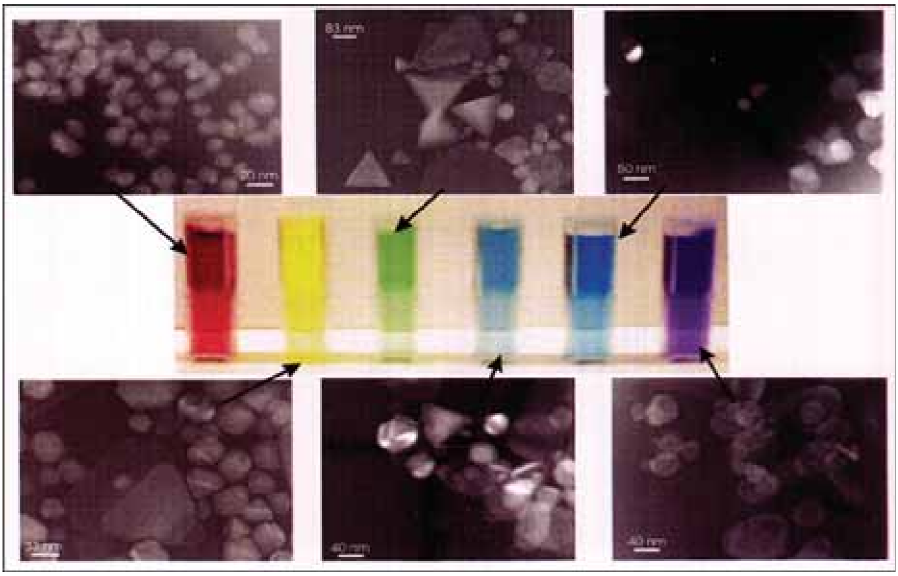
اقتُبست بعد موافقة *J. Gimzewski, UCLA*.

الشكل 2 ـ 1: التقانيون النانويون القدامى

اقتُبست الصورة بعد موافقة *Getty Images*.

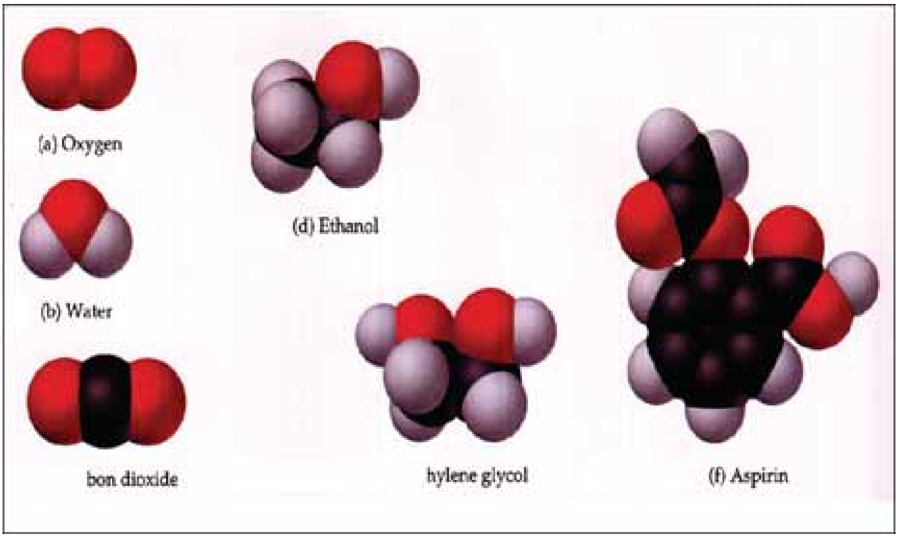
الشكل 2 ـ 2: التقانيون النانويون الحديثون

اقتُبست بعد موافقة *Getty Images*.



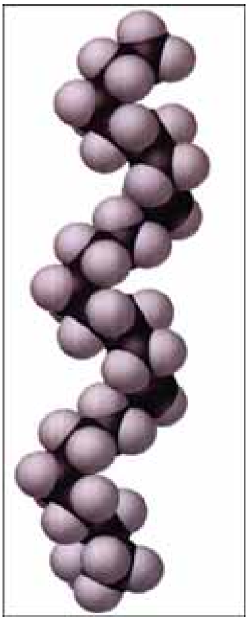
الشكل 2 ــ 3: بلّورات نانوية معلَّقة في محلول. يحتوي كل وعاء على فضة أو ذهب، وينجم اختلاف الألوان عن اختلاف المقاسات والأشكال وفق المبيَّن في البنى العليا والسفلى

اقتُبست بعد موافقة مجموعة *Richard Van Duyne, Northwestern University* .



الشكل 3 ــ 1: نماذج لبعض الجزيئات الصغيرة الشائعة. تمثِّل الكرات البيضاء الهدروجين، وتمثِّل الغامقة الكربون والأكسجين

اقتُبست الصورة بعد موافقة دار النشر من المصدر: Chemistry: The Central Science, *9/e, by Brown/ LeMay/Bursten, © Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ.*

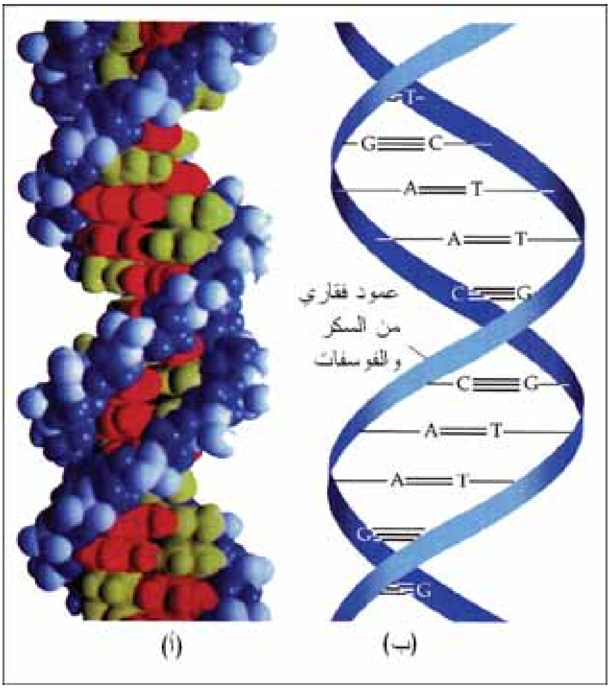


الشكل 3 ـ 2 : نموذج جُزَيئي لجزء من سلسلة البولي إثيلين.

يضمّ هذا الجزء 28 ذرّة كربون (غامقة)، أما البولي إثيلين التجاري فيحتوي على أكثر من 1000 ذرة كربون في الشريط الواحد

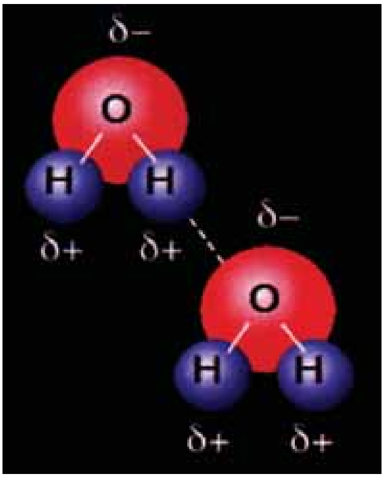
اقتُبست الصورة بعد موافقة الناشر من :

Chemistry: The Central Science, *9/e, by Brown/LeMay/Bursten, © Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ.*



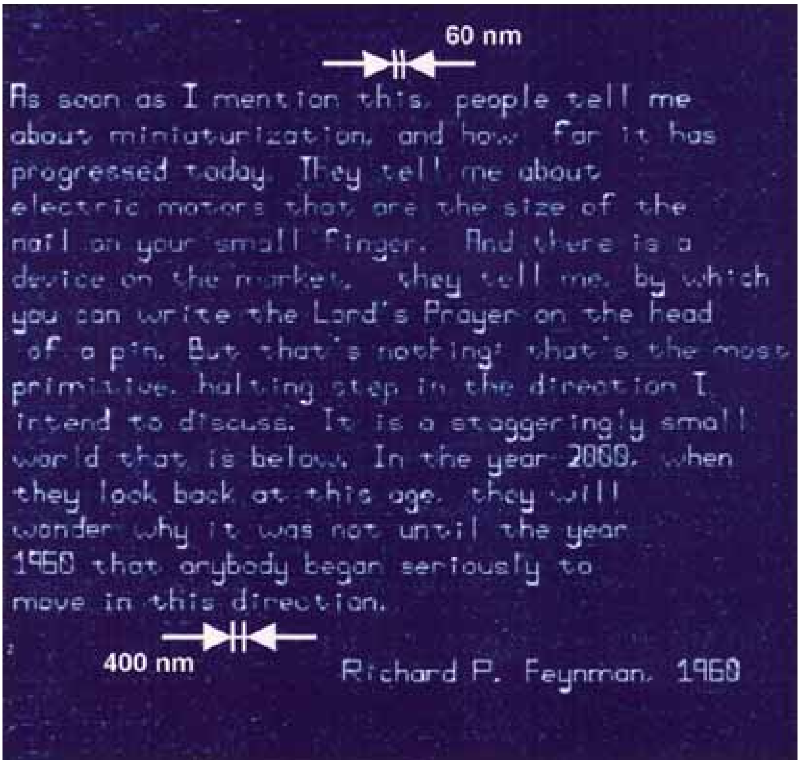
الشكل 3 ـ 3 : (أ) نموذج حاسوبي للولب الدنا المزدوج. (ب) مخطط يبيّن الزوجين الأساسيين الفعليين مرتبطين معاً. تمثّل الكرات الفاتحة الهدروجين، وتمثّل الغامقة الكربون والأكسجين

اقتُبست الصورة بعد موافقة دار النشر من : Chemistry: The Central Science, *9/e, by Brown/LeMay/ Bursten, © Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ.*



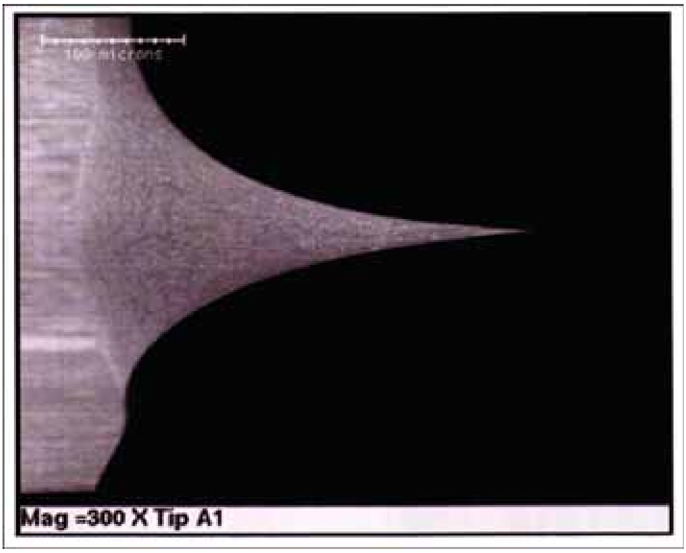
الشكل 3 ــ 4 : ترابط جُزَيئي بين جُزَيئي ماء. يشير الرمزان +δ و −δ إلى الشحنتين الموجبة والسالبة

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory.*



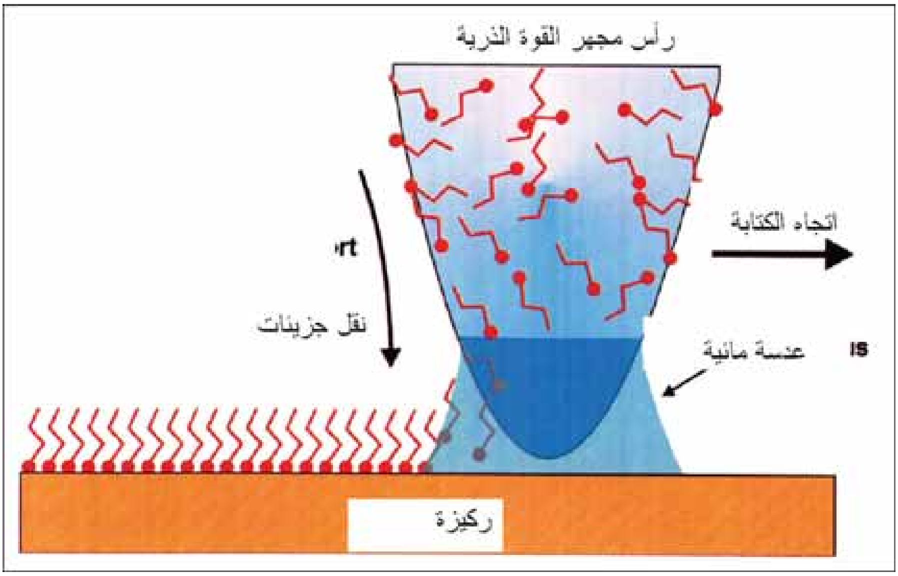
الشكل 4 ــ 1 : الكلمة التي ألقاها ريتشارد فينمان في عام 1960 وأسَّست للتقانة النانوية، وقد كُتِبت في السلَّم النانوي.

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Mirkin Group, Northwestern University* .



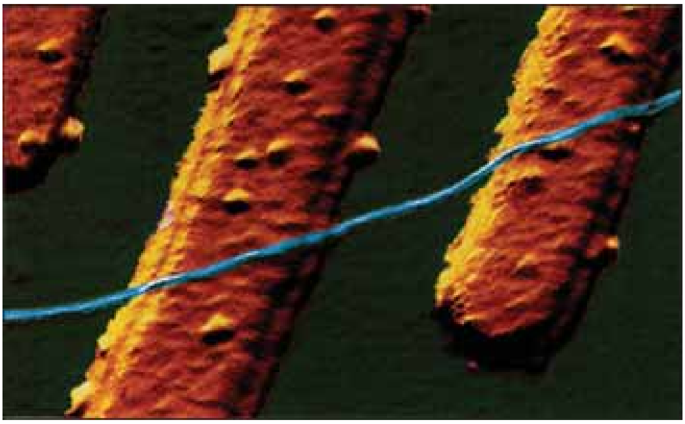
الشكل 4 ـ 2 : رأس مِجْهَر مَسْح نفقيّ مصنوع من التنغستين

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Hersam Group, Northwestern University* .



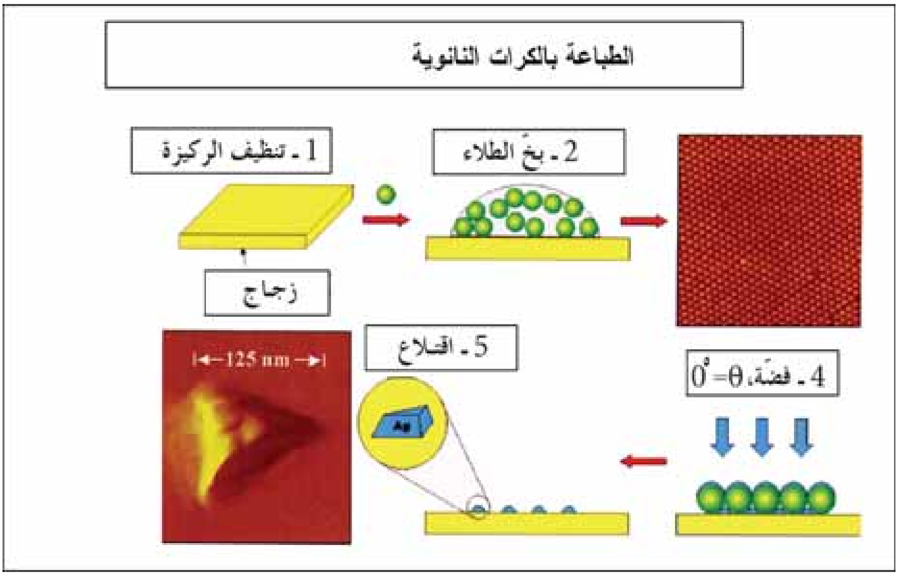
الشكل 4 ـ 3 : رسم توضيحي لآليّة الطباعة بالقلم الغاطس. الخطوط المكسَّرة هي «حِبر» جُزَيئي

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Mirkin Group, Northwestern University* .



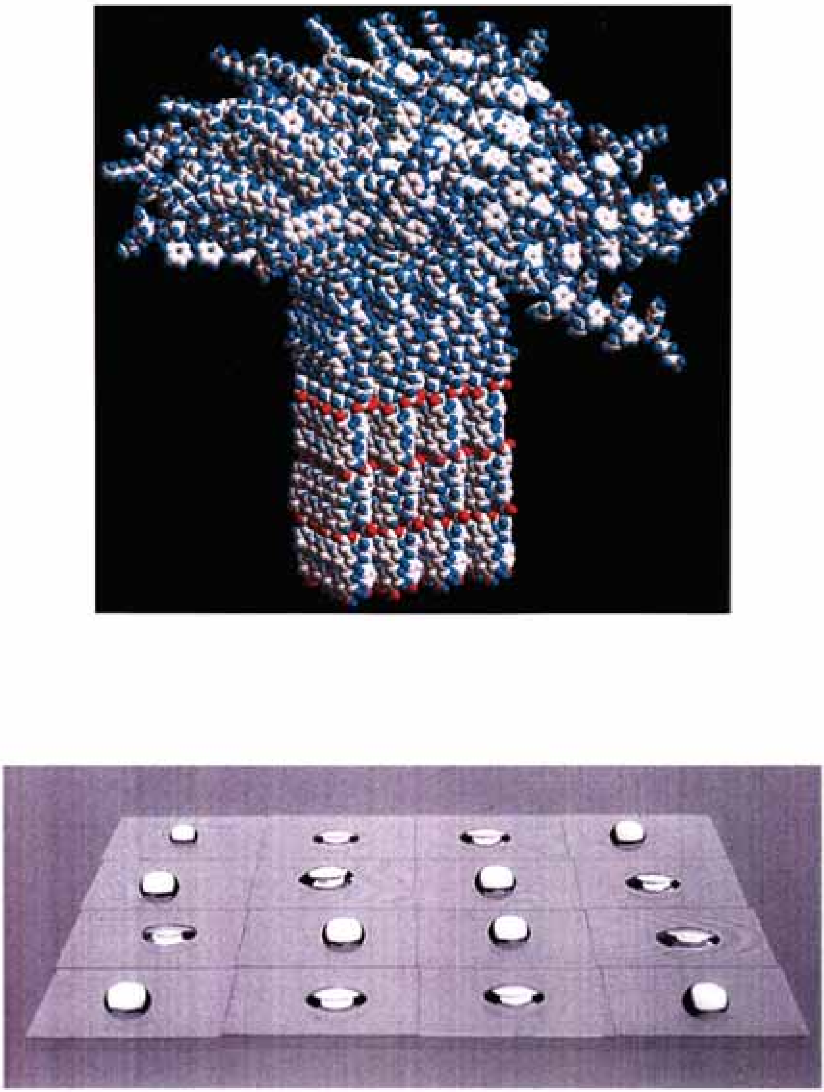
الشكل 4 ـ 4: قُطبان صُنِعا بالطباعة بالحُزمة الإلكترونية
الخيط الأفقي الرفيع هو أنبوب كربون نانوي

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Dekker Group, Delft Institute of Technology* .



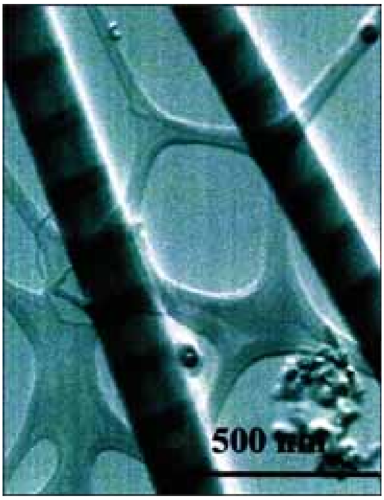
الشكل 4 ـ 5: رسم توضيحي للطباعة باقتلاع الكُرات النانوية

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Van Duyne Group, Northwestern University* .



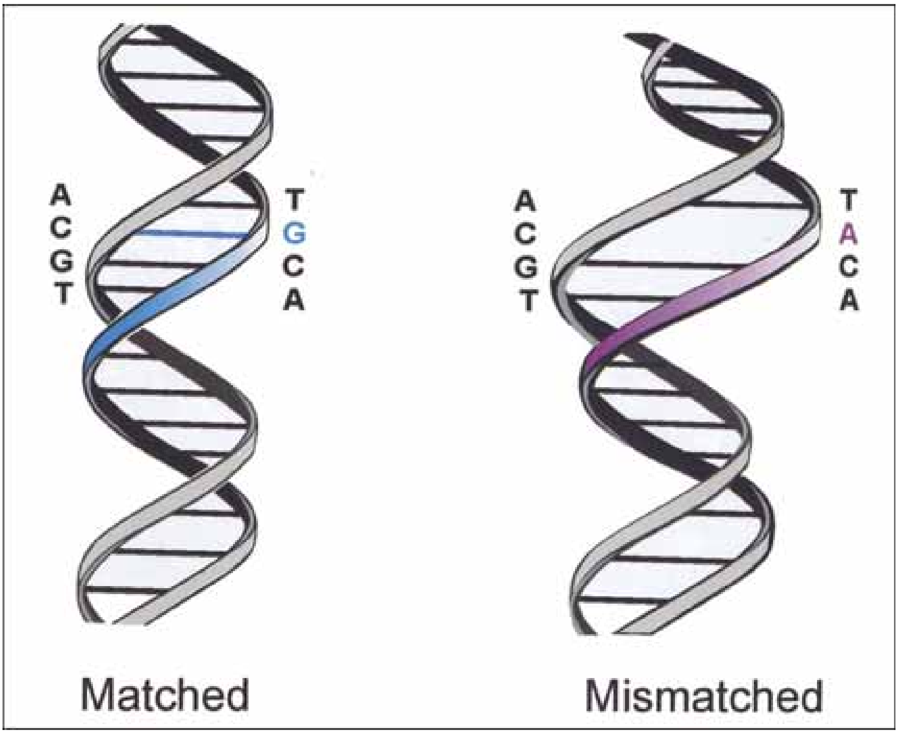
الشكل 4 ـ 6: نموذج جُزَيئي (في الأعلى) لـ «فُطر» ذاتي التجميع (أي بوليمر اللولب القضباني). تُري الصورة في الأسفل التحكُّم في تبليل السطح بطبقة من هذه الفطور

اقتُبست الصورة بعد موافقة: *Stupp Group, Northwestern University*.



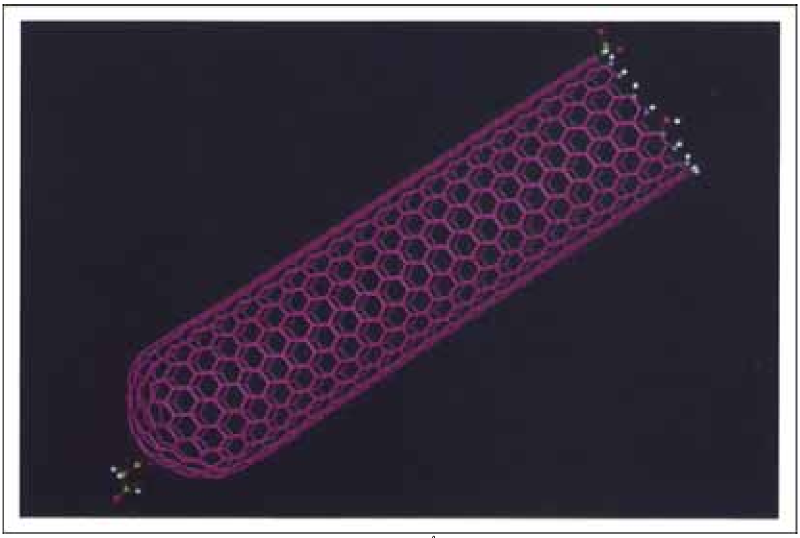
الشكل 4 ـ 7: سلكان نانويان متوازيان. اللون الفاتح هو سليكون، والغامق هو سليكون/ جرمانيوم

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Yang Group, University of California at Berkeley.*



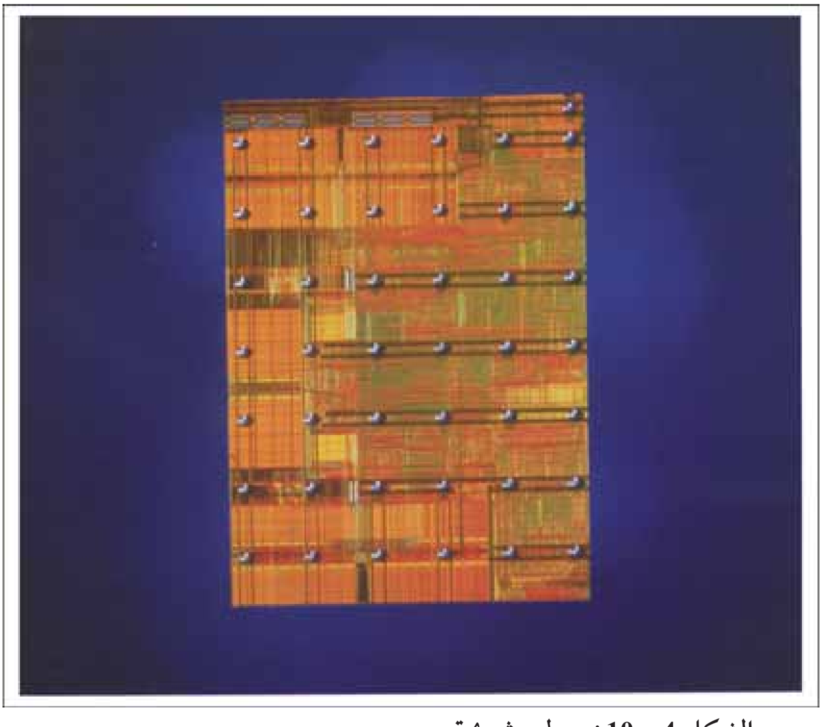
الشكل 4 ـ 8: رسم توضيحي لسيرورة تهجين الدنا. يُري الجانب المتوافق كيف أن شريط الدنا يرتبط ارتباطاً صحيحاً مع متمّمه، ويُري الجانب غير المتوافق كيف أن الأخطاء يمكن أن تمنع الترابط

اقتُبست بعد موافقة : *Mirkin Group, Northwestern University* .



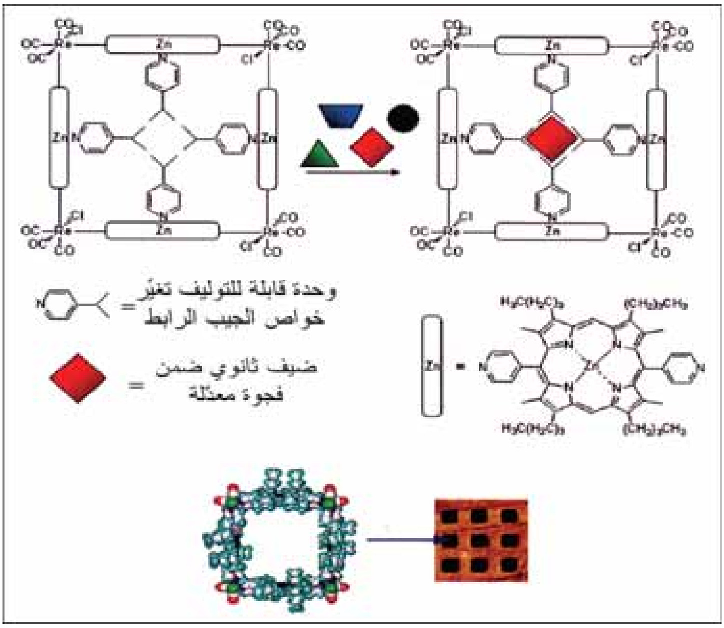
الشكل 4 ـ 9 : أنبوب كربون نانوي أُحادي الجدار

اقتُبست الصورة بعد موافقة : *Smalley Group, Rice University.*



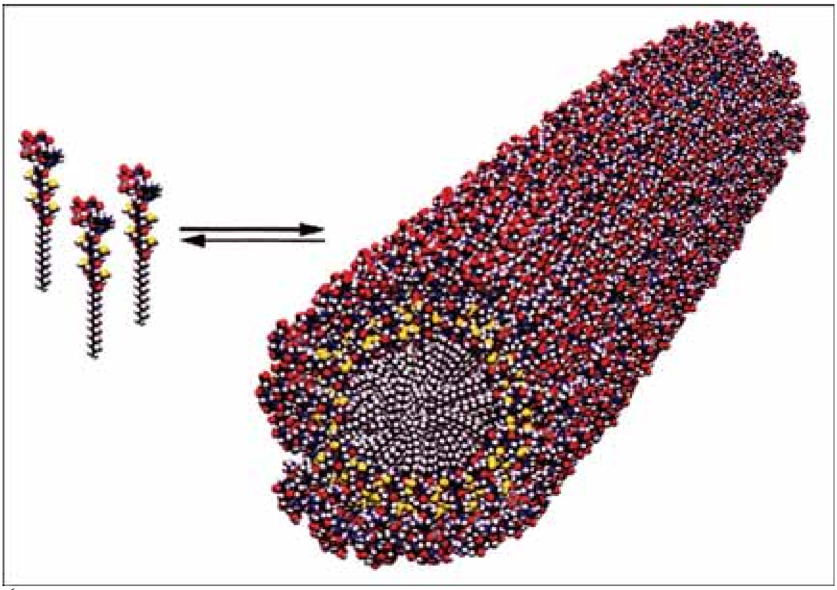
الشكل 4 ـ 10 : سطح شريحة سيموس

اقتُبست بعد موافقة *Tom Way* من *IBM*.



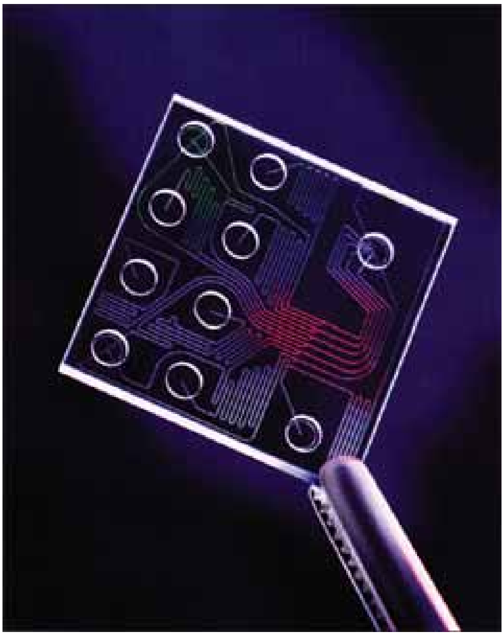
الشكل 5 ـ 1 : علم النانو الكيميائي التركيبي، والمربّعات الجُزَيئية الآسرة للمعادن

اقتُبست بعد موافقة *Hupp Group, Northwestern University* .



الشكل 5 ـ 2 : قالب جُزَيئي ذاتي التجميع لعظم صُنعي. يتجمَّع القضيب الطويل ذاتياً من المكوِّنات الجزيئية الصغيرة، ويتكوَّن نسيج العظم الطبيعي على السطح الخارجي

اقتُبست بعد موافقة : *Stupp Group, Northwestern University* .

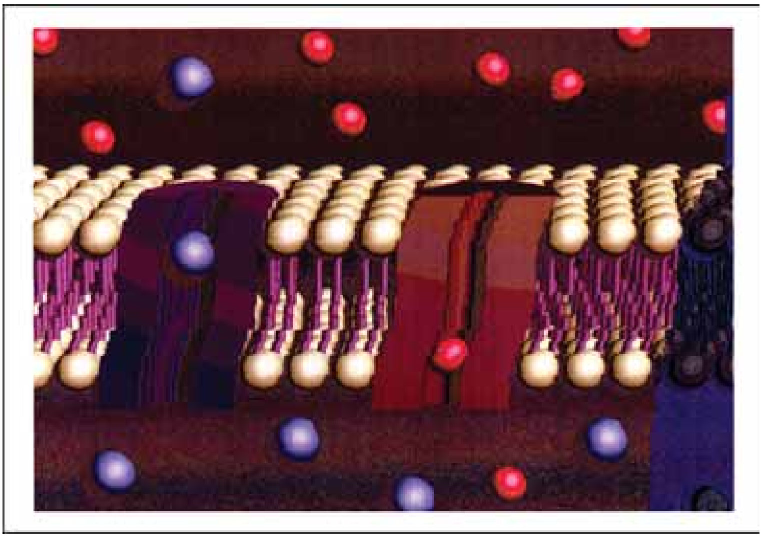


الشكل 5 ـ 3: مخبر على شريحة

اقتُبست بعد موافقة : *Agilent Technologies, Inc* .

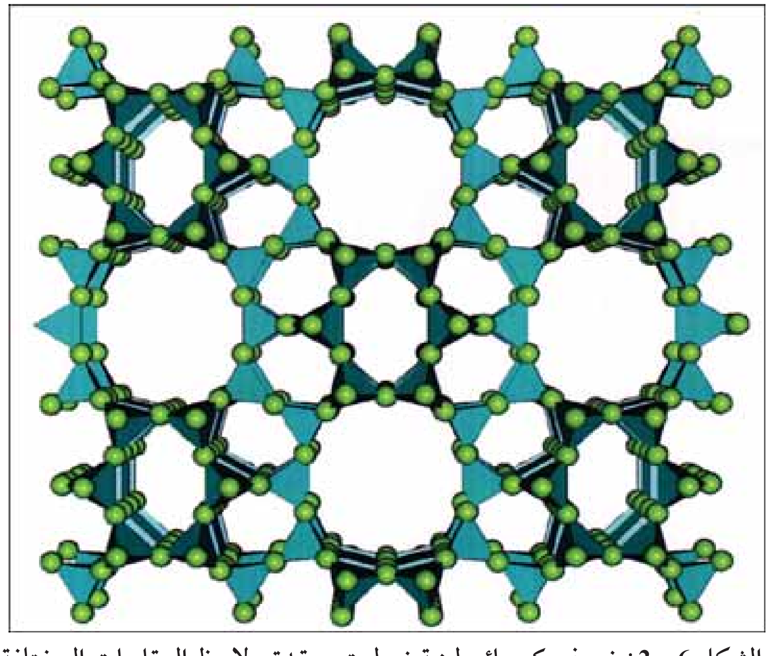
الشكل 5 ـ 4: دليل Hype للتقانة النانوية

اقتُبست بعد موافقة : *Lux Capital* .



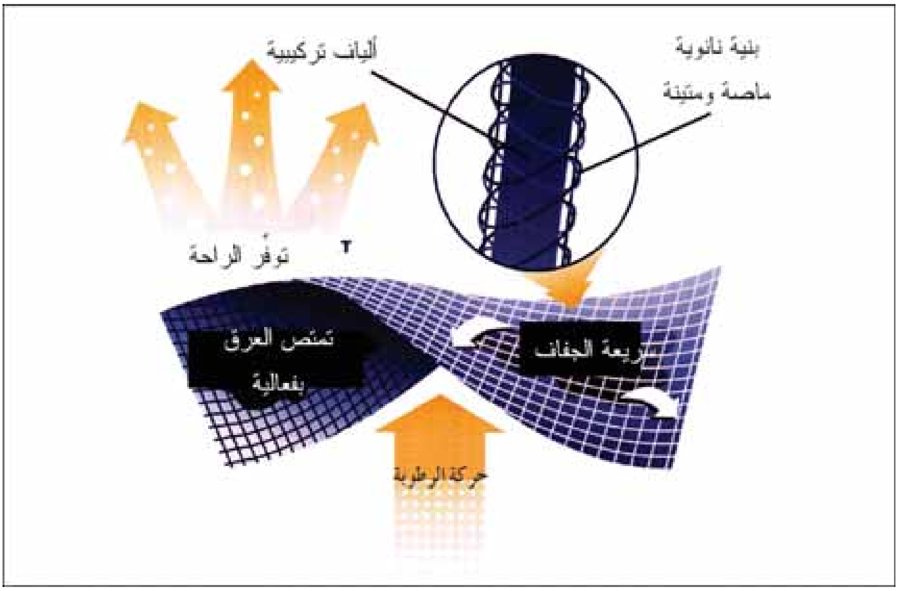
الشكل 6 ـ 1 : نموذج حاسوبي لجزء من غشاء خلية. البالونات الفاتحة أليفة للماء، والشرائط الغامقة نفورة من الماء. والبنى الأسطوانية هي قنوات لنقل الشوارد عبر الغشاء

اقتُبست بعد موافقة الناشر من : *General Chemistry, 8/e, by Petrucci/Howard, ©Pearson Education, Inc..*



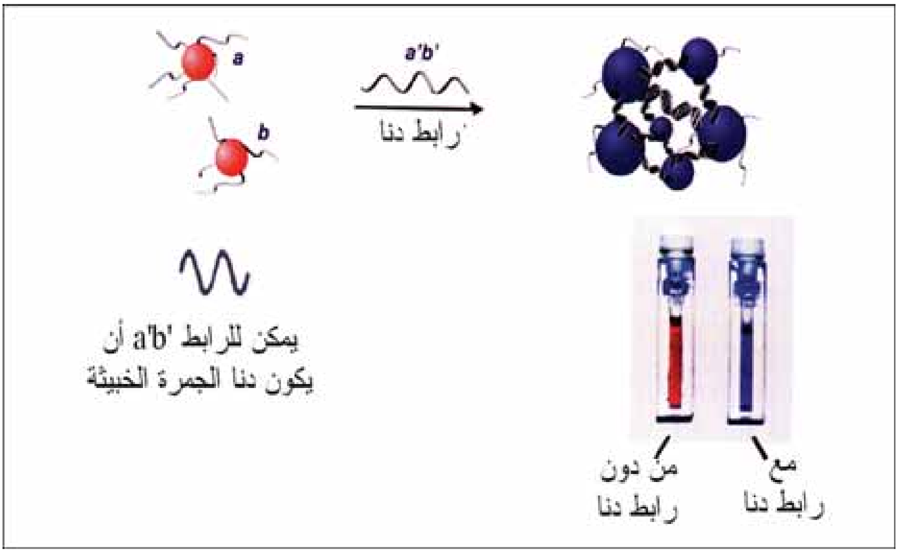
الشكل 6 ـ 2 : نموذج كيميائي لبنية زيوليت معقدة. لاحظ المقاسات المختلفة للثقوب التي تمثِّل القنوات والحجرات

اقتُبست بعد موافقة : *Geoffrey Price, University of Tulsa* .



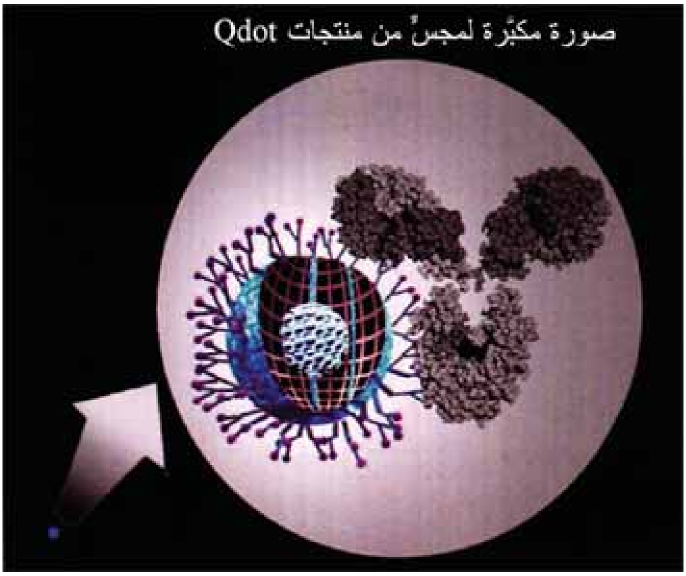
الشكل 6 ـ 3 : المجفِّف النانوي NanoDry .

اقتُبست بعد موافقة الشركة *Nano-Tex* .



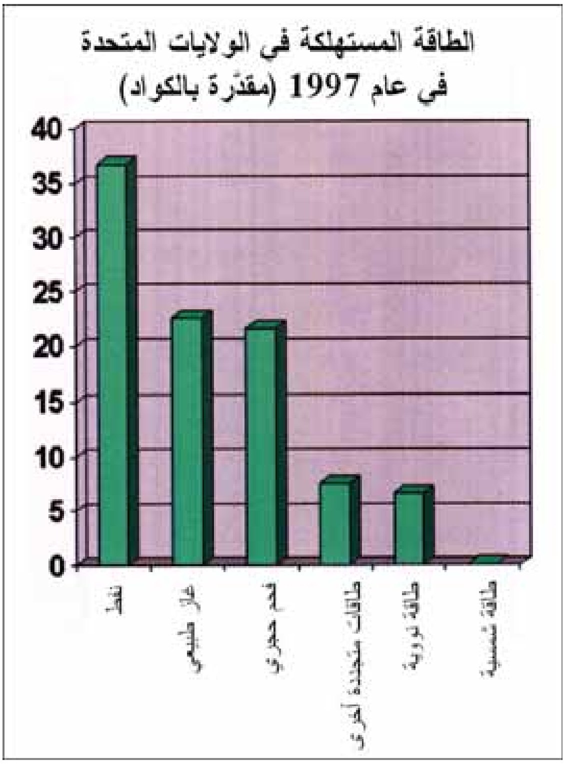
الشكل 7 ـ 1 : يُري الرسم العلوي كيفية تجمُّع النقاط النانوية في مُحِسِّ قياس اللون معاً حين الارتباط بالدنا الهدف (الجمرة الخبيثة في هذه الحالة). تتصف النقاط المتجمّعة بلون يختلف عن لون النقاط غير المتجمِّعة وفق المبيَّن في الصورة الدنيا

اقتُبست بعد موافقة : *Mirkin Group, Northwestern University* .



الشكل 8 ـ 1 : رسم توضيحي لمِجَسّ Qdot .

اقتُبست بعد موافقة شركة : *Quantum Dot Corporation* .



الشكل 9 ـ 1 : استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة. لو أضيف مقدار الطاقة الشمسية الكلّي الذي يسقط على الولايات المتحدة في سنة واحدة إلى المخطط لبلغ طول الخط 400 قدم

10 ـ الأعمال النانوية

■ الازدهار والإفلاس والتِقانة النانوية: الثورة الصناعية التالية؟ 178

■ الأعمال النانوية اليوم 179

■ التِقانة المتقدمة، والتِقانة الحيوية، والتِقانة النانوية 182

■ مشهد الاستثمار 183

■ دروس أخرى من الدوت كوم 188

الازدهار والإفلاس والتِقانة النانوية: الثورة الصناعية التالية؟

بعد رؤية إمكانات التِقانة النانوية من الطبيعي أن نشعر بالابتهاج. فالجميع يبحث عن «الشيء الكبير التالي» الذي يُعيد أيام الاقتصاد الجيدة، وكان النانو أفضل ما يمكن أن يُراهَن عليه. صحيحٌ أنه ليس معروفاً حتى الآن أيٌّ من التقانات الكثيرة التي ناقشناها سوف يتحوَّل إلى ذهب فعلاً (مهما كان لونه)، إلا أنه من المؤكَّد أن يكون لكثير منها مفعول هائل. فهيئة العلوم القومية الأميركية تقدِّر أن صناعة النانو يمكن أن تنمو من اللاشيء فعلياً إلى ما قيمته 1 مليار دولار في العالم خلال خمس عشرة سنة فقط، وهو مستوى من النمو يجعلك تُصاب بالدوار. وفي النهاية، سوف يُصبح النانو قوة اقتصادية أكبر مما هي عليه صناعات البرمجيات أو موادّ التجميل أو العقاقير أو السيارات الآن في الولايات المتحدة، وقد تكون أكبر منها كلها مجتمعة تقريباً.

لكنّ طريقة النظر هذه إلى هذا القطاع مضلِّلة إلى حد ما. فهي تقوم على تنبّؤات نموّ باستعمال بيانات قليلة عن صناعة النانو، ومن المرجَّح أن تبقى نسبة كبيرة من النمو الاقتصادي الناجم عن التِقانة النانوية ضمن قطاعات السوق الموجودة حالياً، ومنها الكيمياء الصناعية والطاقة، مع تحوُّل الشركات الراسخة إلى النانو. ونظراً إلى أن كُرات التنس الشديدة الارتداد والألبسة الداخلِيّة المقاومة للاتساخ، التي تقوم على التِقانة النانوية، قد لا تُسوَّق بوصفها منتجات نانوية فإنه من الصعب على المحلِّلين أن يعثروا على التِقانة النانوية على مائدة الصناعة مباشرة، مع أنها سوف تكون هناك لتضفي نكهتها على الاقتصاد برمّته.

لا تقتصر إمكانات التِقانة النانوية على الشركات والقطاعات الراسخة. فبُغية الاستفادة من الإمكانات المتوفّرة في بعض الأسواق سوف يكون الدافع قويا لتكوين شركات جديدة. ويمكن للمستثمرين ومؤسّسي الشركات الجديدة أن يربحوا (أو يخسروا) من المال، من خلال تأسيس مشاريع من الصفر، ما يفوق كثيراً ما يمكن أن يحقِّقوه بالمراهنة على النموّ المتزايد للشركات الكبيرة. وفي معظم الحالات تمثِّل الأعمال البازغة الطريق الوحيد إلى عوائد استثمارية من رتبة 100 حتى 10000 دولار، حتى بعد الكساد الأخير، ويُرى إلى الشركات الجديدة والمنشقة على أنها سبيل النجاح. من ناحية أخرى، يوحي ازدهار وإفلاس سوق التقانات المتقدمة بين عامي 1998 و2000 بأن هذا السبيل ينطوي

على مجازفة، ويقتضي التفكير ملياً في الكيفية التي سوف تتطور بها صناعة النانو والقيام ببعض التخطيط من الآن قبل اكتمال نموّها.

لقد ظهرت بعض منتجات التِقانة النانوية في الأسواق الآن. ومن المعروف أن الشركات التي تسعى حالياً إلى مبادرات في التقانات النانوية لا تعمل إلا في البحث والتطوير فقط، أو في صناعة موادّ خامّ يستعملها آخرون في بحوث التِقانة النانوية أو المنتجات الصناعية، ومن تلك الموادّ الخام الزيوليتات والأسلاك النانوية والموادّ الجينية المتخصِّصة. وما زال الاستثمار في التِقانة النانوية ضعيفاً برغم الإشارات المتسارعة التي تُري أنه سوف يزداد كثيراً. فصناعة النانو ما زالت إلى حد بعيد في طور التكوين، مع أن ثمة مستقبلاً ذهبياً ينتظرها إذا أُحسنت إدارتها وجرت الاستفادة من دروس ازدهار التِقانة المتقدمة. لكن إذا تجاوزت النشوة والحملة الدعائية حدود التمحيص الدقيق والمبادئ المهنية فسوف يكون ثمة احتمال أكبر لتعرُّض المستثمرين والشركات الناشئة والعاملين في قطاع هذه الصناعة للخداع والأذى. وإذا حصل ذلك سوف يتباطأ النمو والابتكار الحقيقيان المستديمان، ومع إصابة الناس بالإحباط سوف تكون مخاطر تطبيقاتها غير الأخلاقية أكبر من تلك التي ظهرت في تِقانة المعلومات.

لم يكن لدينا ما يكفي من الوقت لنتعلم من أخطائنا، إلا أن بعض تلك الأخطاء جليّ فعلاً. فالتِقانة النانوية تتصف ببعض السِمات التي تمكِّنها من تجنّب كثير من تلك المشاكل، وإنْ كانت تنطوي على تحدّيات ذاتية. وفي هذا الفصل سوف نتطرَّق إلى الحالة الراهنة لأعمال التِقانة النانوية وهي تعبر بوّابة البداية وتمسح الطريق بحثاً عن العقبات التي يمكن أن تعترضها. وسوف نتطرَّق أيضاً إلى بعض الإمكانات الفريدة لأعمال التِقانة النانوية، وسوف نرى سبب عدم حاجتها إلى اتباع نفس المسار الوعِر الذي سلكته الدوت كوم (الإنترنت dot com) حين ظهورها.

الأعمال النانوية اليوم

لقد انقسم مشهد التِقانة النانوية فعلاً إلى ثلاثة أنواع من الكينونات. النوع **الأول** هو مخابر البحث المفتوح، وهي تضم مخابر الجامعات والمخابر الحكومية وبرامج وكالات حكومية منها الهيئة القومية للمقايِس والتِقانة National Institute of Standards and Technology (NIST) والهيئة القومية

للصحة National Institute of Health (NIH). **والثاني** هو الشركات الكبيرة التي تمتلك إمكانات البحث والتطوير والتصنيع والتسويق والتوزيع، ومنها Merck وIBM وDow وKraft و3M وAgilent (التي كانت سابقاً جزءاً من HP). **والثالث** هو الشركات الناشئة والمنشقة التي أسَّسها أساتذة وباحثون وخرّيجو جامعات وآخرون ممن سمعوا فكرة في مخبر ويرغبون في استغلالها تجارياً.

إن عِلْم النانو هو هدف متحرّك، وثمة كثير من الاتجاهات التي يمكن للبحث أن يمضي فيها. والحاجة التجارية إلى منتَج مُعيَّن سوف تدفع البحث بالتأكيد ليذهب في اتجاهات محددة، إلا أنه ما زال ثمة الكثير مما يجب فهمه في السلوك الجوهري للبُنى النانوية الذي يمكن أن يؤدي إلى نشوء مجالات جديدة كلياً تستحوذ على الاهتمام. وثمة حاجة إلى مبالغ مالية طائلة في العمل الأساسي الذي يمكن أن يؤدي، أو لا يؤدي، إلى منتجات تجارية. من واجبات الجامعات والمعاهد الحكومية القيام بهذا النوع من البحث العلمي المحض، إلا أن من المهم أن يقوم متبرّعون من القطاعين العام والخاص في شتّى أنحاء العالم بدعم ذلك البحث دعماً كافياً، وأن تكوِّن المعاهد مراكزَ متعددة التخصّصات للتِقانة النانوية. ثمة فعلاً عدة مراكز كبيرة من هذا النوع في الولايات المتحدة، منها مراكز جامعات نورثوِسترن وهارفارد ورايس وإلِّنوي وبوردو وكورنِّل وكاليفورنيا ولوس أنجلوس وتكساس وبركلي، ومركز معهد ماساشوستش للتِقانة MIT. لكنْ خلافاً لتِقانة السليكون لا تحتاج التِقانة النانوية إلى التمركز عند السواحل.

ومع أن كثيراً من الجامعات مجهَّز بوسائل البحث العلمي النانوي فإن التِقانة النانوية لن تكون، حتى بالنسبة إليها، عملاً تجارياً كالمعتاد. فهي لا تحتاج إلى مراكز متخصصة في علم النانو فحسب، بل قد تواجه أيضاً «تسرُّب الأدمغة» الذي ميَّز فُقّاعة الدوت كوم في أمكنة عديدة منها جامعة ستانفورد والمعهد MIT. فكبار الباحثين سوف يجدون أنفسهم أمام اكتشافات ذات قيمة تجارية كبرى، وسوف يكونون في موقع عليهم أن يختاروا فيه ما بين إقامة مشاريع، أو إعطاء رخص لاستعمال اكتشافاتهم، أو وضعها في النطاق العمومي، أو وضعها لدى الهيئة الائتمانية في معاهدهم. وقد شوهد هؤلاء الباحثون وطلابهم فعلاً لدى وكلاء نقل التِقانة النانوية حيث تُقدَّم إليهم تعويضات كبيرة كي ينتقلوا إلى القطاع الخاص.

وهذا ما يجعل احتفاظ الجامعات بهم شديد الصعوبة. فخلافاً لتِقانة المعلومات، التي يمكن لأي شخص أن يتدرّب عليها ليصبح تقنياً ويبلغ درجة أن يكون منتِجاً خلال أشهر، يتطلب علم النانو في معظم الأحيان معرفة علمية عميقة وخبرة من مستوى الدكتوراه. لذا يُرجَّح أن يكون ثمة نقص في المواهب على المدى القصير، خاصة إذا اتسع ظهور شركات التِقانة النانوية الناشئة.

أما الشركات الكبيرة الراسخة فسوف تتمتع ببعض المزايا في عالم التِقانة النانوية. فكثير منها يستطيع فعلاً إدخال التِقانة النانوية في خطوط الإنتاج الموجودة لديه، وسوف يكون موجوداً حيث يمكن أن يكون التصنيع والتوزيع غالياً وثمة إمكان للإنتاج الكمّي الواسع النطاق. ومن بين بعض الرابحين الواضحين سوف تكون شركات صناعات صيدلانية وشركات صناعة شرائح مكروية. فالشركات الصيدلانية تتمتع بنفوذ يمكِّنها من الحصول على موافقة إدارة الغذاء والدواء الأميركية على الأدوية، إضافة إلى المصداقية والقنوات والمال والقوة القانونية التي تصل بالأدوية إلى السوق. ويمتلك مصنِّعو الشرائح المكروية مرافق تصنيع تصل قيمتها إلى مليار دولار، وهذه قيمة تفوق كثيراً موازنة حتى أفضل الشركات الناشئة تمويلاً.

لكنّ الشركات الكبيرة تواجه أيضاً نفس الصعوبات التي واجهتها في حِقبة ازدهار التِقانة. فهي تعاني من بطء وتعقيد إجراءات إقرار واعتماد وتسويق المنتجات الجديدة. فالفكرة الجديدة يجب أن تُباع إلى الشركة أولاً قبل أن يُمكن بيعها إلى زبائن خارج الشركة. وأقسام البيع والتسويق المثقلة بالأعباء قد لا تكون قادرة على التكيُّف بسرعة مع التغيُّرات الكبيرة في خطوط إنتاج الشركة، ويمكن للمنتجات الجديدة أن تُهمل بوجود منتجات أكثر ربحاً وإنْ كانت أقلّ حداثة. ومن ناحية أخرى فإن معظم الشركات الكبيرة هي شركات عمومية وأصبحت تخضع لتدقيق متزايد، خاصة في ما يتعلق بالرهان على التقانات الجديدة، وذلك بعد الانهيار غير المتوقع لشركات عملاقة مثل Global Crossing وEnron. أما الشركات الخاصة الصغيرة فتكون عادة تحت إدارة أكثر صرامة وأقل عُرضة للمخاطر. وإلى حد ما، قد يكون على الشركات العالمية الكبيرة أن تعتمد على تلك الشركات الصغيرة في استقصاء أحوال وظروف التِقانة الجديدة قبل أن تحصل على ترخيص في الناجح منها أو شراء المشاريع التي فرَّختها. لكنْ على الشاري هنا أن يكون حذراً. فخلال بضع السنوات

السابقة لم تكن الشركتان Lucent Technology وCisco وحيدتين في جلب المتاعب إليهما من جرّاء قيامهما بشراء غير حكيم (وعالي السعر) لشركات روَّجت على نحو سريع خاطف لمنتجات لها لا تخصّ في الواقع أيّ خط إنتاج لمنتج أساسي.

أما الشركات الناشئة فسوف تملأ الجزء المتبقي من مشهد التِقانة النانوية. وفي هذه الأيام تكفي أحياناً الكلمتان «شركة ناشئة» لمنعك بهدوء من المشاركة في نقاش مهذّب، أو لإرسالك لتلعب مع الأولاد الآخرين، لكن ذلك ليس عدلاً. فمفهوم الشركة الناشئة يبقى صحيحاً برغم إساءة استعماله في بضع السنوات الأخيرة. وبفضل الدروس المستقاة من الماضي يمكن تجنّب كثير من الأخطاء التي ميَّزت «قنابل الدوت».

التِقانة المتقدّمة، والتِقانة الحيويّة، والتِقانة النانوية

ثمة سوابق للتنبّؤ بالكيفية التي سوف يقسَّم بها سوق التِقانة النانوية بين صغير وكبير. لكنْ بالنظر إلى الطريقة التي تطوّرت بها صناعتا التِقانة المتقدمة والتِقانة الحيوية ظهر توجُّه تنزع فيه الشركات الناشئة الصغيرة إلى النجاح في التِقانة الثورية، في حين أن الشركات الكبيرة تنحو إلى النجاح في تطوير التِقانة الناضجة. على سبيل المثال، انظر إلى قصص النجاح العظيم الذي أحرزته شركات التِقانة المتقدمة (صناعات تِقانة المعلومات والإنترنت والحواسيب الشخصية في المقام الرئيسي). وهي شركات جديدة نسبياً، منها Microsoft وApple وDell وCompaq وYahoo وeBay وCisco، مقارنة بالشركات القديمة الموثوقة التي منها IBM وHP وSiemens وHitachi وSony. هذا لأن الحواسيب الشخصية المنزلية والإنترنت لم تحلّ محلّ حواسيب وشبكات قديمة أو تطوّرت منها، بل كانت منتجات جديدة كلياً لم تحلّ محلّ شيء.

أما التِقانة الحيوية فهي على النقيض من ذلك تماماً. صحيحٌ أن بعض طرائق التِقانة الحيوية، القائمة على علم الأحياء الجُزَيئي وكيمياء البروتينات والحموض الأمينية والتداول الجُزَيئي، جديدة، إلا أن غرض معظم تلك التقانات الجُزَيئية كان التقدُّم المستمر ضمن إطار الأعمال الراسخة الخاصة بتطوير العقاقير. لذا مكَّنت طرائق التسويق والخبرة والموارد الأخرى الموجودة لدى الشركات القديمة الكبرى، التي منها Merck وGlaxo وPfizer وLilly وAbbott وBaxter وPharmacia، تلك الشركات من الاستمرار في الهيمنة على صناعة العقاقير. صحيحٌ أن التِقانة

الحيوية قد جلبت إلى السوق عدة شركات كبيرة جديدة ناجحة، ومنها Genentech وAmgen، لكنْ نظراً إلى أن معظم منتجاتها لم تكن جديدة كلياً فقد انتهت معظم أرباحها إلى الشركات القديمة.

ونظراً إلى أن التِقانة النانوية هي طريقة لتحسين كثير من التقانات الجديدة الناشئة والمتطورة، التي تمتد من أشياء بسيطة من قبيل الطلاء أو الزجاج أو السطوح غير الزلقة حتى أشياء تنبثق من أفكار مستقبلية من قبيل مُحِسَّات القياس اللوني النانوية والملتقيات العصبية الإلكترونية، فإنها سوف تمتلك بعضاً من أوجه كل من صناعات التِقانة العالية والتِقانة الحيوية. من ناحية أخرى، ونظراً إلى أن كثيراً من تطبيقات التِقانة النانوية المنظورة تقع في مجالات الاستهلاك والطب والزراعة والطاقة، فقد يكون من الصحيح أن معظم الإنجازات الكبيرة سوف تكون مملوكة من قبل كبار الصناعيين الموجودين فعلاً في تلك الأسواق. لكنّ هذا لا يعني أن الاستثمار في الشركات الناشئة والشركات متوسطة الحجم والشركات الكبيرة المتمحورة حول التِقانة النانوية لن يكون ناجحاً. فقد حقّقت تلك الشركات نجاحاً أكيداً في أعمال التِقانة الحيوية، لأنها طوّرت منتجات وسيرورات وخبرات وحقوق ملكية فكرية خاصة بها، وغدت بذلك مرشّحة مُغرية لاستلام الزمام، فقام بشرائها كبار اللاعبين عموماً. وكان ذلك من مصلحة الجميع. فالمستثمرون والمطوّرون في الشركات الصغيرة حصلوا على مكاسب اقتصادية جيدة، لأن تطوير المنتجات حصل بسرعة وكفاءة، ولأن تحويل المنتجات إلى سلع استهلاكية فعلية حصل بقوة اللاعبين الرئيسيّين ومن خلال قنواتهم إلى السوق وقدراتهم الكبيرة على التوزيع.

إلا أن أنماط تنقيح وتطوير التِقانة النانوية ما زالت غير واضحة المعالم حتى الآن، مع أن مؤلّفَي هذا الكتاب يراهنان على أنها سوف تكون شبيهة بالتِقانة الحيوية أكثر من تِقانة المعلومات أو التِقانة المتقدمة.

مشهد الاستثمار

صحيحٌ أنه من الممكن بالتأكيد تحقيق أرباح من الاستثمار في شركات عمومية كبيرة لديها مبادرات تِقانة نانوية (وكثير من الهيئات الاستثمارية الكبيرة وشركات توظيف الأموال سوف تنحو هذا المنحى)، إلا أن الطريقة التي تبدو أكثر إثارة للاستثمار في قطاع اقتصادي سريع التطور هي الاستثمار في الشركات البازغة. لذا، وبرغم تأكيدنا أن معظم الأحداث سوف تكون في الشركات

الكبيرة، فإن من المفيد النظر عن كثب إلى ما يمكن لتلك الشركات البازغة أن تكون عليه، وإلى ما يمكن لكل من الشركات والمستثمرين أن يتعلّموه من دروس الماضي. لقد كانت ثمة احتجاجات شعبية شديدة من أجل «العودة إلى قواعد الأعمال الاقتصادية الجوهرية»، إلا أن ثمة مزايا عظيمة أيضاً في الوصول السهل إلى رأس المال وإلى بيئة الأعمال الودودة للشركات الناشئة، وإلى آليّات الدعم التي طُوِّرت في بضع السنوات السابقة.

تختلف أعمال التِقانة النانوية عن أعمال تِقانتي المعلومات والإنترنت بعدد من الجوانب المفتاحية. فالتِقانة النانوية مبُنية على حقوق ملكية فكرية يمكن حمايتها وتسجيلها اختراعاً ويصعب نسخها. ويُقاس الزمن اللازم لنَسْخ منتَج أو سيرورة نانويين غالباً بالسنوات، لا بالشهور، وعلى المنافس اتباع نهج مختلف كلياً في الإنتاج أو ترخيص الاختراع الموجود. أما في عالم الإنترنت فلم يمنع شيء شركة Barnes and Noble من تطوير موقع إنترنت يضاهي Amazon.com وينافسه مباشرة. فقابلية تسجيل الابتكارات القائمة على الإنترنت اختراعاً مشكوك فيها في أحسن الأحوال وفقاً لما اتضح من محاولة أمازون الفاشلة لحماية اختراعها الخاص بـ «الطلب بنقرة واحدة one-click ordering» (اعتُبر أن من الجليّ جداً أنه اختراع). وقد أصبح الآن من المقبول عموماً أن «مزية السبق»، أي المكسب الأولي الصغير الذي تحصل عليه بكونك أول من يسوِّق منتَجاً جديداً، تعطيك هامشاً خالياً من المنافسة يدوم نحو 3 إلى 6 أشهر، وهي مدة تقل عما يستغرقه كثير من الناس ليعلموا بوجودك. وبعد تلك المدة سوف يستنسخ شخص ما مُنتَجك، وقد يضمِّنه تصحيحات لأخطاء تعلّمها من مراقبته لنموذجك الأول. وإذا كان المنافس الجديد شركة راسخة فإنها سوف تستعمل قاعدتها من الزبائن والإعلام والشهرة والمقدرة الإعلانية للسيطرة على السوق. لكن هذا لن يكون صحيحاً تماماً في حالة التِقانة النانوية إذا كان المنتَج المطوَّر ثورياً حقاً. فسيرورة الطباعة النانوية الجديدة يمكن أن تُحمى، والجهة التي ترغب في استعمالها يجب أن تدفع مقابلِ ذلك، حتى لو كانت من أكبر الشركات وأكثرها رسوخاً. وهذا يمكن أن يشكّل عقبة كبيرة في وجه المنافسة ويقلِّص أيضاً احتمال إفلاس الشركات بسبب ضغط الأسعار الناجم عن منافسة شبه تامة، من قبيل تلك التي حصلت في صناعة الاتصالات. وهي تقود أيضاً إلى لُغز أخلاقي. إذا سُمِح للشركات بتسجيل بعض السيرورات الطبيعية الأساسية اختراعاً، من قبيل السلاسل الجينية، فإن ذلك سوف يضع

قيداً قاتلاً على تطوير الأدوية والبحوث الأخرى. وقد مثَّل ذلك مشكلة للتِقانة الحيوية في وقت ما.

في حالة التِقانة النانوية ثمة بضعة عوائق في وجه اعتماد السوق لمعظم المنتَجات الجديدة. فلكي تنجح أي شركة للإنترنت يجب أن يكون لديها زبائن في الإنترنت. وعندما ظهرت مواقع الإنترنت اقتضى ذلك تشجيع الناس ليتعلموا استعمال الحواسيب والاتصال بالإنترنت والاستمتاع بإجراء المبادلات عبرها. وقد حصل ذلك ببطء، وحصل أيضاً بسبب مليارات دولارات التسويق التي أنزلتها إلى السوق شركات الإنترنت الناشئة في المقام الأول، ومعظم تلك المليارات لن يُستعاد أبداً. لكنْ في ما يخص التِقانة النانوية لا يوجد مثل هذا العائق. فليس ثمة من حاجة إلى أي سيرورة لدفع أحد إلى استعمال حاسوب أسرع يقوم على شريحة نانوية أو لتناول مستحضر صيدلاني نانوي. قد يحتاج المهندسون الذين يصمّمون المنتجات إلى شيء من التعلُّم الضروري لاعتماد الموادّ والسيرورات الجديدة، وقد يحتاج الأطباء إلى تدريب إضافي، وقد تحتاج الورشات وخطوط التجميع إلى تحديث، إلا أن هذا التعلُّم موجود في كل مكان فعلاً ولن يؤثِّر في طلب المنتجات الجديدة حينما تصبح متوفّرة.

أي إن التِقانة النانوية قد تنطوي على مزايا تنافسية متأصّلة فيها وعلى عوائق في وجه المنافسة. وقد تكون صناعة جديدة مع عتبة صغيرة لاعتمادها. لكن برغم كل هذه المزايا التي تجعل لُعاب مؤسِّسي الشركات والمستثمرين يسيل، ثمة صعوبات جديدة أيضاً، وإحداها هي أن مدة تطوير المنتَج الطويلة ذات حدين. فهي لا تمثِّل عقبة في وجه المنافسة فقط، بل تعني أيضاً مدّة أطول لتسويق المنتَج. والمستثمرون الذين تعوَّدوا أن يتوقَّعوا عوائد مالية من استثماراتهم خلال سنتين أو ثلاث سنوات قد يضطرون إلى إعادة النظر في استثماراتهم، خاصة إذا كانوا يعملون مع شركات منغمسة في مسائل شديدة التعقيد من قبيل التحسينات النانوية للبصريات أو الحَوْسَبة. فهذه أعمال ممتلئة بالتحدّيات التي يجب أن تضاف إلى مشاكل مكاملة المنظومات وتصنيعها للوصول إلى النجاح التجاري. أما المنتجات النانوية التي هي أبسط من قبيل المُحِسَّات والموادّ الذكية فيمكن أن تولِّد عوائد أسرع.

وعلى غرار مواقع الإنترنت، لن تأتي أفكار تأسيس الشركات الجديدة

بالضرورة من أناس مناسبين لتأسيس الشركات، بل من العلماء والمهندسين. وهؤلاء المؤسِّسون يجب أن يكونوا محاطين بفرق إدارة قوية قادرة على إدارة المال والناس والشراكات. ويجب أن تكون لديهم فِرَق لتطوير المنتجات وتسويقها، إضافة إلى فرق البحث، ويجب أن يخضعوا لرقابة شديدة بُغية إبقاء موازناتهم تحت السيطرة ولتطوير منتجات رابحة. والمستثمرون في الشركات الناشئة أو في الأسهم قد لا يفهمون بسهولة العلم الذي تستند إليه المنتجات الجديدة، لكنهم يجب أن يفهموا الأعمال والناس. لقد كان من السهل نسبياً في شركات الدوت كوم التخلُّص من المؤسِّسين المزعجين أو تجاهل قراراتهم، أما في شركات التِقانة النانوية الناشئة فسوف يكون هذا الأمر شديد الصعوبة وإذا كان المؤسِّسون يُنتجون منتجات قائمة على حقوق ملكية فكرية أقيمت الشركة عليها فإن استبدالهم لن يكون ممكنا، وصرفهم من الشركة سوف يكون كقتل الإوزّة التي تبيض البيضة الذهبية. ومع أن ثمة طرائق لمنعهم من نقل أفكارهم إلى مشاريع أخرى فهذا ما لا يمكن تنفيذه بسهولة.

وسوف يكون أمام شركات التِقانة النانوية الناشئة الكثير مما يجب أن تتعلّمه من شركات التِقانة الحيوية. فبعد اختراعها لمنتَج أو سيرورة يمكنها أن تحاول إنتاجهما أو الترخيص للغير في استعمالهما أو بيع حقوق ملكيتهما (أو بيع الشركة) كلياً ومباشرة. وكثير من اللاعبين القدامى، من قبيل Applied Nanotech وMolecular Electronics يميل إلى الترخيص مقابل المال. ويمكن بعدئذ إعادة استثمار هذا المال في بحوث ذات صلة بالمنتَج المباع، وهذا ما يمكِّنها من تنويع منتجاتها. على سبيل المثال، تدّعي شركة Applied Nanotech أن لديها فعلاً 68 براءة اختراع، وأن ثمة 86 اختراعاً آخر تنتظر التسجيل. والاستراتيجية العامة هنا هي توفير تدفق للمال بأقل نفقات إضافية. وإذا كان التدفُّق المالي كافياً أمكنه أن يمثِّل خطة بديلة للسيولة، أي إن الشركات لا تحتاج إلى أن تصبح عمومية أو أن تُباع كي يحصل المستثمرون على أموالهم. ويمكن لهذه الاستراتيجية أن تستبعد تكاليف هائلة من العمليات الجارية لأن إعداد التقارير والرقابة المالية والتسجيل والمتطلبات الأخرى الناجمة عن التحوُّل إلى شركات عمومية يمكن أن تستنفد كثيراً من وقت الشركة ومواردها. لقد قرر كثير من شركات التِقانة الحيوية أن يتحوَّل إلى شركات عمومية، ونجح في ذلك، إلا أن شركات التِقانة النانوية قد لا تحتاج إلى ذلك إذا كان رأس المال اللازم للبحث متوفرا بالقدر الكافي.

ومع أن رأس المال المغامر هو أحد الخيارات فقد لا يكون أفضل مسار للشركات في مراحلها الأولى التي تحاول دخول التِقانة النانوية. فالذين كوَّنوا خبرة في التِقانة النانوية حتى الآن من أصحاب رأس المال المغامر هم قلة، ولذا لا يستطيع المغامرون أن يقدِّموا إلا المال إلى أن يعطي البحث نتائج عملية. أما بعض البدائل الأخرى من قبيل المنح ورأس المال الأولي واستثمارات المرحلة الأولى فتأتي من البرامج الحكومية. ومن تلك البرامج مشروع الابتكارات البحثية الصغيرة Small Business Innovation Research (SBIR) وبرنامج مشروع نقل التِقانة الصغيرة Small Business Technology Transfer (STTR)، اللذان يستطيعان تقديم منح كافية لإطلاق الشركات ولديهما حصة من موارد المبادرة القومية للتِقانة النانوية مخصّصة لهما. وقد موَّل هذان البرنامجان التِقانة النانوية منذ عام 1996. ومن المسارات الأخرى قروض برنامج إدارة المشاريع الصغيرة Small Business Administration (SBA) وشركات الاستثمار في المشاريع الصغيرة Small Business Investment Companies (SBICs)، وهما برنامجان مشتركان هجينان من برامج حكومية ومساهمات خاصة. وثمة أيضاً مجموعة مختارة من شركات رأس المال المغامر (ذُكِر بعضها في الملحق أ) التي بدأت بالتحرُّك نحو النانو.

تجدر الإشارة إلى أن الوكالات الحكومية قد احتُضنت لتكون شريكة في التِقانة النانوية على نحو لم يحصل قط من قبل مع شركات التِقانة المتقدمة. فثمة اهتمام خاص حقا بالتِقانة النانوية، والمجموعات الداعمة لها، من قبيل تحالف الأعمال النانوية NanoBusiness Alliance، والسياسيين، ومنهم نيوت غينغريش Newt Gingrich (الذي يسمّي نفسه في موقعه في الوِب «نيوت النانوي») وجو ليبرمان، الذين تحوَّلوا إلى الاهتمام بها والانخراط فيها. والحكومة الأميركية تنفق موارد كبيرة على التِقانة النانوية (برغم تقليصها الدعم الكلي للبحوث العلمية الأساسية) وتقوم بدور نشط في تطويرها.

في الماضي، تجاهلت شركات التِقانة المتقدمة (وشركات التِقانة الحيوية الصغيرة إلى حد ما) واشنطن واعتمدت كلياً تقريباً على الموارد ورؤوس الأموال الخاصة. وأحد أسباب هذا الاختلاف هو أن التِقانة النانوية عالمية حقاً: تسيطر الشركات الأميركية على أسواق تِقانة المعلومات والإنترنت، في حين أن معظم الابتكارات إثارة في التِقانة النانوية تأتي من أوروبا وآسيا. ومن دون دعم

حكومي قوي في المراحل الأولى لا يستطيع بلد الاحتفاظ بموقع الصدارة في العلم الذي يمكن أن يغيِّر كل شيء.

قد تكون أفضل نصيحة للأفراد الذين يرغبون في كسب المال من المسرح النانوي هو أن ينتظروا قليلاً. فشركات التِقانة النانوية العمومية قليلة جداً، والحكم على أفكار التِقانة النانوية يحتاج إلى كثير من الخبرة والتجربة. إذا كنت قد استثمرت في شركات توظيف أموال مصنَّفة تبعاً للسوق في السنوات القليلة السابقة، فلا بد أنك قد فعلت ما هو أفضل كثيراً مما فعله كثير من البسطاء والمغامرين ذوي المعرفة الضعيفة. ومن المرجَّح أن يكون هذا صحيحاً أيضاً في التِقانة النانوية. يقول بيتر لينش: «اعرف ما تملكه، وامتلك ما تعرفه».

دروس أخرى من الدوت كوم

برغم انفجار فُقّاعة الدوت كوم، ما زال من السهل جداً على الشركات الجديدة الحصول على رأس مال كما كان الحال في أي وقت قبل عام 1998. ومع أن النظام المالي أبعد ما يكون عن الكمال فإنه ما زالت هناك مقادير هائلة من الأموال المخصَّصة لشركات الاستثمار المساهمة الخاصة يمكن أن تُستعمل في التِقانة النانوية. لكن كما أن نقص المال اللازم للاستثمار يمثِّل مشكلة فإن الاستثمار المفرط يمكن أن يؤدي إلى متاعب أيضاً. وبقطع النظر عن مدى سخونة التِقانة وعن الحاجة الملحّة لنقلها إلى السوق، ما زال ثمة حد لمقدار المال الذي تستطيع شركة امتصاصه واستعماله على نحو مفيد لأعمالها. ففي حين أن الشركة التي هي بحاجة ماسة إلى المال لا تستطيع تسديد فواتيرها، أو أن استئجار علماء وتقنيين ضروريين لها، فإن الشركة المتخمة بالمال سوف تزيد من إنفاقها زيادة غير مبرّرة على الأغلب، رافعة تكاليف بُنيتها التحتية ومقلِّصة عوائد الاستثمار. ويحدث ذلك عندما تقتني الشركات مكاتب أكبر مما تحتاج إليه، وتستأجر يداً عاملة قبل الحاجة إليها، وتُخفق في تطبيق التدقيق المالي الملائم على منتجاتها الجديدة، ولا تراقب تكاليف التسويق والنثريات بعناية.

لا يمثِّل الاستثمار المفرط مشكلة للشركات وحدها. فعندما يقدّم البنك الدولي أو صندوق النقد الدولي قروضاً للدول والحكومات فإنهما، ينظران إلى مقدرتها على الاستيعاب. فمن المعروف أن الدولارات التي تفيض عن ذلك المستوى سوف تُنفق وتُهدر على الفساد. صحيحٌ أنه لن تُدار جميع الشركات

كما أُديرت شركة Boo.com (واحدة من أسوأ المجرمين في عالم الإنترنت)، وأن شركات المحاسبة تعلمت بلا ريب أن تكون أشد حرصاً في حِقبة ما بعد شركة Enron، إلا أن المقدرة على الاستيعاب شيء من الضروري تذكُّره. خلال السنوات القليلة السابقة، تحدَّدت مقادير الأموال التي ظهرت في دوائر الاستثمار بالمقدار الذي أراد المستثمر دفعه لإبرام صفقة في المقام الأول، وبالنسبة المئوية من الشركة التي رغب في امتلاكها، وبالقيمة المالية التي حدَّدها للشركة بدلاً من إجراء موازنة لمقدار المال الذي تحتاج الشركة إليه فعلاً لتحقيق أهدافها ولمدى تطابق قيمتها المقترحة مع حجم سوقها وجودة خطتها. وفي ما يخص شركات التِقانة النانوية التي تكون في مراحلها الأولى، يمكن تجنّب هذه المخاطر الخفية بإقرار معالم طريق المشروع منذ البداية، وتحضير موازنة مفصّلة له، والإبقاء على حجم الأعمال صغيراً ما أمكن وكبيراً بحسب الحاجة.

إلا أن تحديد معالم طريق المشروع قد يكون صعباً على مستثمرين في حقل تقاني كحقل التِقانة النانوية. لذا يجب أن يقوم طرف ثالث مؤهّل بتحديد تلك المعالم وبالحكم على توجّهات الأعمال في ذلك الحقل أيضاً. وبالفعل، ثمة كثير من الباحثين الذين يعملون مستشارين لدى شركات صناعية كبيرة، لكن الشركات الاستثمار قد ترغب في النظر في علاقات رسمية بدلاً من تلك العلاقات الاستشارية السائدة حالياً التي تحصل أثناء شرب فنجان قهوة. هذا يمكن أن يؤدي إلى تحليل أكثر عمقاً للمفاهيم الجديدة، وسوف يعطي فكرة أفضل عن جودة التوجهات الجديدة ومدى كونها مقبولة، وهي أمور ليست واضحة دائماً في التِقانة النانوية. ومع أن هذا النمط من الاستشارة غال فإنه يمكن أن يحفظ الملايين من دولارات المستثمرين وأن يزيد أيضاً من عقد الصفقات الجيدة. إن بعض هيئات التِقانة النانوية، ومنها جامعة نورثِوسترن، تعمل على إقامة برامج شراكة بين الجامعة والصناعة يمكن أن تكون مثالية لهذا التطبيق، حيث يمكن للمستثمرين الأذكياء أن يأتوا بخبراء الأعمال وإدارة المخاطر وعقد الصفقات، دون أن يحاولوا التعاطي مع الجانب التقني.

وعلى الرغم من ذلك كلّه تبقى التِقانة النانوية أعمالاً شاملة، لا تنقيحاً جديداً لأشياء نعرفها. ومع أن هذه التِقانة ثورية، وأن بعض البُنى الداعمة

للشركات الناشئة قويت خلال السنوات القليلة القادمة، فإن معظم القواعد السابقة ما زالت صحيحة. فالأعمال تحتاج إلى مسار واضح إلى الربح، وتحتاج إلى فرق تنفيذية حسنة الخبرة وجيدة التنوع ينضم إليها الشخص المناسب في الوقت المناسب. وهي تحتاج إلى وضع توقعات المستثمرين والمديرين التنفيذيين معاً دون تعارض على نفس الخط، وتحتاج إلى علاقات عمل جيدة في القمة. ولا حاجة إلى أن تكون خطط ونماذج الأعمال النانوية معقدة، فمعظمها سوف يقوم على إطار عمل شركة تِقانة حيوية أو شركة بحث مستقلة. والتحدي ليس أن تتوافق الأعمال الهندسية مع التِقانة النانوية بل هو أن تتوافق التِقانة النانوية الهندسية مع الأعمال.

11 ـ أنت والتِقانة النانوية

«إضافة إلى أن اكتشافات العلم الحديث تولّد آمالاً عظيمة،
فإنها تزرع أيضاً حقول ألغام أخلاقية هائلة».

جورج و. بوش

■ **التِقانة النانوية: الآن وهنا** 192

■ **الأخلاق والنانو: النظر إلى المخفيّ وراء بشائر التِقانة النانوية** 197

التِقانة النانوية: الآن وهنا

كيف سوف تبدو الحياة في أيام ازدهار التِقانة النانوية؟ كيف سوف يؤثِّر تطويرها في حياة الناس اليومية؟ إن التقدُّم في صنع الحواسيب فائقة السرعة والأجزاء الميكانيكية ذات المقاسات الجُزَيئية والموادّ فائقة المتانة، كلها أمور عظيمة، لكن ماذا تعني لي في حياتي؟

تأتي هذه الأسئلة من أناس يشاهدون الإعلانات الدعائية للتِقانة النانوية لكنهم ليسوا بالضرورة من أنصار التقانات أو من الذين يخططون للمدى البعيد. لقد نما ذكر التِقانة النانوية في الإعلام أُسِّياً مع تحوُّل موضوع النانو إلى موضوع ساخن (انظر الشكل 5 ـ 4)، لكن متى تدخل التِقانة النانوية حياتنا فعلاً وتصبح، ليس الشيء الكبير التالي، بل الشيء الكبير الحالي؟

الجواب هو إلى حد ما «الآن». تعود الأفكار الأصلية الخاصة بالتِقانة النانوية إلى نحو 20 سنة مضت، وقد بدأت بضعة الابتكارات الأولى المستلهمة من النانو بالوصول الآن إلى رفوف المتاجر. ومع ذلك يبقى الجيل الأول من السلع النانوية مجرّد تلميح إلى ما سوف يأتي.

لقد بدأت التِقانة النانوية تُشعِر بوجودها في الصناعة منذ مدة، وثمة كثير من تطبيقاتها الشائعة. ونظراً إلى أن الجدل القائم على المستوى القومي هو ذاك الدائر حول سياسة الطاقة والنفط فإن المثال الممتاز للصناعة التي دخلتها التِقانة النانوية قد يكون تكرير النفط. فالزيوليتات، أي المصافي الجُزَيئية، التي ناقشناها في الفصل السادس، تُستعمل الآن لزيادة الغازولين المستخلص من برميل النفط الخام بقدر يصل إلى 40 في المئة مقارنة بالمحفِّزات التي حلّت محلّها. لقد كانت شركة Mobil أول من طوَّر هذه التقنية التي تدرأ وفقاً لبعض التقديرات هدر نحو 400 مليون برميل من النفط كل عام (ما يكافئ نحو 12 مليار دولار) في الولايات المتحدة وحدها. إن هذه الطريقة قيد الاستعمال منذ مدة طويلة، لذا لا تتوقَّع تخفيضاً في سعر البنزين في محطة الوقود القريبة منك قريباً، لأن ذلك قد حصل حين البدء باستعمالها أول مرة. ومع ذلك تُري الزيوليتات القيمة العظيمة (وغير المعترف بها جيداً) للتِقانة النانوية.

لكنْ ما هي أشكال التِقانة النانوية التي يُرجَّح أن نراها أو نلمسها؟ قد يكون أول عنصر في لائحة السلع الاستهلاكية هو إحدى الموادّ الذكية التي منها

الطلاءات وصفائح الإكساء. صحيحٌ أنك لن تضع الطلاءات وصفائح الإكساء على لائحة التسوُّق الخاصة بك، إلا أنها تحيط بك كل يوم. تأخذ هذه الموادّ الذكية شكل طبقات رقيقة من موادّ مختلفة مهندَسة في السلَّم النانوي كي تحسِّن منتجات أخرى بطرائق مختلفة. من ذلك على سبيل المثال أن نوافذ سلسلة السيارات الجديدة طراز Audi A4 مطلية بصفائح زجاج تحجب الأشعة فوق البنفسجية الضارة التي يمكن أن تسبّب سرطان الجلد. من ناحية أخرى، يقوم معهد الموادّ الجديدة في ألمانيا بتصنيع نوافذ تحتوي على طبقات نانوية من موادّ يتغيّر لونها من صافٍ إلى أزرق غامق حين إشعال ضوء. ويمكن استعمال هذه الطريقة بديلاً لتظليل أو تعتيم النوافذ، ويطلي الآن بعض منتجي السيارات النوافذ والسطوح الأخرى بطبقات فائقة القساوة ومقاومة للخدش يمكن أن تجعل خدش السيارة بالمفتاح شيئاً من الماضي.

وإضافة إلى النوافذ، بدأ مصنّعون ألمان ويابانيون، منهم Nanogate Technologies، ببيع بلاط حمّامات ومطابخ لا يتسخ لأنه من المستحيل على جُسَيمات الوسخ والغبار الالتصاق بطلاء ذلك البلاط، تماماً كالطعام الذي لا يلتصق بأواني التيفال. ويمكن تشريب تلك البلاطات ذاتية التنظيف بجُسَيمات نانوية مضادة للجراثيم. وهذا ما يمنع نموّ الفطور وعوامل التفسخ التي تغزو الحمّامات، ويُحسِّن التطهير الشامل. ويمكن لهذه البلاطات أن تضع حداً لمهمة تنظيف الحمام المقيتة، وهذا شيء قد يرى فيه الكثيرون مبرّراً كافياً لدعم كل التِقانة النانوية.

لكن الدعم المبكر للتِقانة النانوية لم يأتِ من منظِّفي الحمّامات، بل من مجموعات من قبيل المولعين بالحاسوب. لم ينشأ هذا الدعم لأن مستعملي الحاسوب هم من عشاق التقانات الجديدة مهما كان نوعها، بل لأن التِقانة النانوية توفّر الكثير لعالم الحَوْسَبة أيضاً. وحتى بالنسبة إلى أولئك الذين لا يحتاجون إلى حاسوب كمّومي على مكاتبهم، فإن تنوّعاً كبيراً من المنتجات المثيرة جداً سوف يكون متوفراً قريباً. لن تستطيع شراء حاسوب ذي معالج بنتيوم مصنوع من الدنا بمناسبة عيد الميلاد هذه السنة، لكنك سوف تستطيع تقديم طلب لشراء بعض الأنواع الجديدة من شاشات الحاسوب.

كانت الشاشات مركز اهتمام هندسة الحاسوب طوال السنوات القليلة الماضية. فتدريجياً، أخذت شاشات صِمام الأشعة المهبطية الثقيلة الشبيهة بالتلفزيون بالتنحي

جانباً لتحلّ محلّها شاشات البلّورات السائلة liquid crystal displays المسطحة. تتصف شاشات البلّورات السائلة بمردود عالٍ من حيث استهلاك الطاقة، وهي تسبّب ضغطاً أقلّ على العيون، وحجمها صغير نسبياً. لكن المساحة القابلة للرؤية في شاشة البلّورات السائلة أصغر عادة من تلك التي في شاشة صمام الأشعة المهبطية (قليل منها يتجاوز مقاسه الـ 24 إنشا)، وصورها أقلّ سطوعاً عموماً، ويجب النظر إليها مباشرة من الأمام، لا من الجانب. وتُحدِّث شاشات البلّورات السائلة الصورةَ ببطء، وهذا ما يجعل الأفلام والصور المتحركة تبدو شبه متقطعة. لذا تحوَّلْ إلى شاشات الثنائيات المشعّة للضوء light emitting diode displays.

لا بد أن كلاًّ منا قد رأى ثنائياً مُشِعّاً للضوء. إنها دبابيس ضوء ساطع تُستعمل غالباً في التجهيزات الإلكترونية على شكل مؤشّرات إلى وجود التغذية الكهربائية أو إلى حالة الجهاز، أو أضواء خلفية. وباستعمال التِقانة النانوية يمكن الآن مكاملة هذه المصابيح الشديدة السطوع على لوحة بكثافة كافية لتكوين شاشة. وبوضعها على شكل مجموعات ثلاثية (أحمر وأخضر وأزرق)، وبمزج ألوانها أثناء التحكُّم بشدات سطوعها، يمكن الحصول على جميع الألوان. يساوي مقاس شاشة الثنائيات النانوية المشعة للضوء مقاس شاشة البلّورات السائلة، لكنها أشد سطوعاً حتى من شاشات صمام الأشعة المهبطية، وهي تسمح بعرض ناعم وسَلِس للصور المتحركة. وعلى غرار شاشات البلّورات السائلة، وخلافاً لشاشات صمام الأشعة المهبطية، لا تتطلب شاشات الثنائيات المشعة للضوء تحويل الصور من رقمية إلى تماثلية(*)، وهي عملية تخفِّض جودة الصورة. لقد ظهرت شاشات الثنائيات المشعة للضوء منذ مدة، وهي مستعملة في كثير من لوحات الإشارات (تحتوي شاشة ناسداك في ساحة تايمز في نيويورك على نحو 19 مليون ثنائي مشع للضوء). إلا أن ما تضيفه التِقانة النانوية إليها هو المقدرة على تصغيرها إلى حد وضعها في مجموعات لونية قابلة للتحكُّم فيها ورزمها بكثافة كافية لتكوين صورة مستمرة ناعمة بالنسبة إلى عين الإنسان.

(*) من حيث المبدأ، يجب تحويل الإشارة الرقمية إلى تماثلية لأن السطوع مقدار تماثلي، وجميع الشاشات الموجودة في الأسواق تحتوي في داخلها على مبدل رقمي تماثلي. لذا لا حاجة إلى التبديل الرقمي التماثلي الخارجي (المترجم).

وتحاول التِقانة النانوية أيضاً تحسين صِمامات الأشعة المهبطية القديمة النفيسة. فباستعمال الأنابيب النانوية لاستبدال مدافع الإلكترونات الماسحة قلَّص مصنِّعون من قبيل سامسونغ تلك الشاشات وخفَّضوا استهلاكها من الطاقة. وحتى أنه من الممكن أن تصبح تلك الشاشات صغيرة وخفيفة وذات كفاءة عالية بقدر يكفي لاستعمالها في الحواسيب المحمولة.

وثمة تِقانة شاشات أخرى تسمّيها إحدى الشركات المطوِّرة لها (الشركة الإيرلندية Ntera) اللونيات النانوية NanoChromics وتسمّيها شركة أخرى (الشركة E Ink) الحبر الإلكتروني electronic ink، تعيد إلى الحياة مجدداً فكرة من تسعينيات القرن العشرين، لم تكن عملية حينئذ، هي الورق الرقمي. وفكرة الورق الرقمي في الأصل هي صُنع حواسيب محمولة باليد ذات شاشات رقيقة جداً يمكن أن تُفتح وتُقرأ كالكتاب. ويمكنك نقل ملفّات رقمية إلى تلك الحواسيب فتمكِّنك من خزن ما ترغب فيه من الكتب والوثائق، ويُصبح العالم في النهاية بلا ورق. لكن كان ثمة عدد من المشاكل في تلك الشاشات الأولى. فقد كانت عالية استهلاك الطاقة وكبيرة الحجم، ولم يكن النظر إليها سهلاً كسهولة النظر إلى صورة ورقية (كان ميْز الشاشة أقل بأربع مرّات من مَيْز الصور المطبوعة). وأتت التِقانة النانوية لتغيِّر ذلك: تُستعمل في بعض شاشات الورق الرقمي النانوية الجديدة نفس الموادّ الكيميائية المستعملة في الورق لتكوين منظر شبيه بالورق، وعناصر الصورة فيها، أي البكسلات pixels، هي عناصر منطقية ثنائية الاستقرار بحيث أنها تحافظ حين برمجتها لإظهار صورة معيّنة على تلك الصورة دون استهلاك طاقة إضافية. وبرغم أن الناس قد يستمرون في تفضيل ملمس الكتاب والشعور به لأسباب كثيرة، فإن من المرجَّح أن يتَّخذ الورق دوراً كبيراً في لوحات الإعلان الضوئية، لأن التِقانة الحالية لطباعة الأشكال الكبيرة وتصحيح أخطاء الطباعة وشحن اللوحات ما زالت غالية.

ولا يقتصر وجود التِقانة النانوية على المجالات التي تُعتبر عادة حقول تِقانة متقدمة. فالنانو أصبح اليوم في الأزياء بكل معنى الكلمة. فقد مكَّنت التطورات الحاصلة في الموادّ المركَّبة الجُزَيئية شركات من قبيل Nono-Tex من إيجاد الجيل القادم من القماش والملابس. والموادّ المقاومة للاتساخ كلّياً تقريباً، التي تجمع طراوة القطن والألياف الطبيعية إلى متانة وديمومة الموادّ التركيبية التي من قبيل النايلون، نزلت فعلاً إلى الأسواق في منتجات من Eddie Bauer وLee Jeans وBurlington Industries، وهي أم Nano-Tex. وإضافة إلى

الطراوة والمظهر الأنيق، تتضمّن نُسُج أخرى قائمة على التِقانة النانوية نفس النوع من العوامل المضادة للجراثيم الموجودة في بلاط الحمّام دائم النظافة. ويمكن لهذا القماش أن يكون عظيم الفائدة في المستشفيات، حيث تشيع العوامل المُمْرِضة ويخضع المرضى لخطر العدوى في ما بينهم.

وثمة صناعة أخرى تُستعمل فيها التِقانة النانوية أيضاً هي صناعة التجهيزات الرياضية. فألياف الكربون وموادّ الغرافيت المركَّبة بدأت بالظهور في الدراجات خفيفة الوزن وفي قوارب كأس أميركا الشراعية. واستُعملت ألياف الزجاج واللدائن لصنع كُرات قدم وفُوَط حماية أفضل للاعبي الهوكي. وقد بدأت التِقانة النانوية بالسيطرة على هذا الحقل. وتُستعمل الآن في كُرات التنس المستخدمة في Wilson's Double Core مادة مركَّبة نانوية صلصالية لجعل الكُرات ترتد إلى مسافات بعيدة (وتعيش مدة أطول بمرتين حتى أربع مرّات وفقاً لقول Wilson)، وهي الآن الكُرات الرسمية لكأس ديفيس (Davis Cup)، وأدخلت Babolat أنابيب نانوية فائقة القوة في مجموعة مضارب التنس التي تصنعها لتحسين الارتداد ومقاومة الأسلاك. ومن المؤكَّد أن الأنابيب النانوية سوف تلقى قبولاً أوسع في التجهيزات الرياضية مع انخفاض أسعارها (عصيّ الغولف المحسَّنة بالأنابيب النانوية في طريقها إلى السوق)، مع أننا سنراها الآن في أيدي المحترفين على الأغلب ونحن ننتظر.

إن الحقل الأخير الذّي سوف تضيئه التِقانة النانوية حقاً هو الطب. ففي حين لم يُنظر إلى الطب يوماً على أنه سلعة استهلاكية، فقد تغيِّر التِقانة النانوية تلك النظرة. فوسائل اختبار الحمل المنزلية قد شهدت فعلاً تحسينات في سهولة الاستعمال وسرعة النتيجة والدقة العامة منذ البدء بتضمينها جُسيْمات نانوية، والاختبارات المنزلية الأخرى في طريقها لتصبح عملية. ويأمل بعض العلماء رؤية اختبارات لكل شيء، من الجمرة الخبيثة حتى الأيدز، وقد بُسِّطت بقدر يكفي للاستعمال الذاتي، وذلك من خلال التِقانة النانوية. وبالفعل فقد كانت السلع التي من قبيل الضمادات والتعويضات أهدافاً لمشاريع التِقانة النانوية الأولى.

في المحصِّلة، ومع أن معظم ما تَعِد به التِقانة النانوية ما زال في المستقبل، فقد تسللت فعلاً إلى حياتنا من خلال بيوتنا وحواسيبنا وألعابنا، وحتى أجسامنا. لقد وصل إلينا زمن التِقانة النانوية حقاً.

الأخلاق والنانو: النظر إلى المخفيّ وراء بشائر التِقانة النانوية

مع دخول التِقانة النانوية المنصّة الرئيسية وبدء سخائها بالتحوُّل إلى حقيقة، سوف تُثار عدة مسائل تخص الأخلاق والسياسة العامة والقانون والمسؤولية الاجتماعية. ومعظم تلك المسائل ليس جديداً، إلا أن التِقانة النانوية تزيد من ضرورة وأهمية مناقشتها.

ولعل أهم الأسئلة التي يجب طرحها على المدى القصير هي تلك المتعلقة بتسجيل الاختراعات. فالتِقانة الحيوية والصناعات الصيدلانية هما قطاعان من الصناعة مؤهّلان لاكتساب الكثير من التِقانة النانوية لأن علاجات العديد من أخطر الأمراض في العالم، وحتى أدويتها الشافية، قد تكون ممكنة من خلال التِقانة النانوية. ووفقاً للقوانين الحالية في كثير من الدول يمكن للمطوّرين وشركات البحث أن تسجّل العقاقير والأنماط الجينية وتقنيات التركيب اختراعات. وقد وُفِّرت حماية الاختراع تلك للباحثين لنفس الأسباب التي تمنح بموجبها براءات الاختراع للشركات في الصناعات الأخرى، أي لتشجيعهم على الابتكار ولتمكينهم من التعويض عن التكاليف التي أنفقوها على البحث والتطوير وعلى اختبار منتجاتهم.

ليس هذا التبرير لمنح براءة الاختراع بلا مغزى. فالبحث الصيدلاني باهظ التكلفة وينطوي على مجازفة. وقليل من الأدوية التي يحصل تطويرها يُعتبر فعالاً ويجتاز عمليات الإقرار والسيرورات التشريعية المفصّلة، ويصل في النهاية إلى المستشفيات والصيدليات. من ناحية أخرى، يمكن لمصنِّعي أدوية غير منضوين تحت علامة مسجّلة أن يقلِّصوا نفقاتهم تقليصاً هائلاً بتجنّب إجراء البحث والذهاب إلى السوق مباشرة مولِّدين منافسة غير عادلة بتقليدهم للدواء إذا لم تمنعهم براءة اختراع. ويجادل كثير من الأطباء والحكومات والمنظمات الاجتماعية بأن براءة الاختراع لا تمكِّن من التعويض عن تكاليف تطوير الدواء فحسب، بل تُبقي الاكتشافات سرّية أيضاً، فلا يمكن استعمالها لتشجيع مزيد من التطويرات، وبذلك تحتكرها الشركات الصيدلانية متعددة الجنسيات الكبيرة لتحقيق أرباح طائلة غير عادلة. ومن تلك الحالات ما حصل لمانع التخمّر المتعدد العقارات المسمّى cocktail والمستعمل في علاج الإيدز. في عام 2001، كانت تكلفة شراء الدواء لمعالجة شخص واحد على مدى عام كامل في الولايات المتحدة 10000 دولار. وقد جعلت هذه التسعيرة الدواء بعيداً

تماماً عن متناول الأفراد الذين يعيشون في أفريقيا وأميركا الجنوبية حيث لا يتجاوز متوسط دخل الفرد ألفي دولار سنوياً. أما مصنِّعو الأدوية غير المنضوين تحت العلامة المسجلة (ومنهم شركة Cipla الهندية التي تعترف بها الآن منظمة الصحة الدولية) فقد أنتجوا الدواء بجزء صغير من تلك التكلفة، وهذا ما مكَّن البرازيل من تطبيق واحد من أنجح برامج مكافحة الأيدز في العالم. قد يبدو هذا انتصاراً، فمن الواضح أن كل شخص يتمنّى أن يُصبح الإيدز مسيطراً عليه، إلا أن ملاّك براءة الاختراع اعترضوا وحاولوا مقاضاة المصنِّعين غير المنضوين تحت العلامة المسجلة، وادّعوا أنهم لن يستطيعوا متابعة البحث في عقاقير جديدة لإيجاد علاج حقيقي شاف للمرض إذا لم يُسمح لهم بالتعويض عن تكاليفهم.

وحصلت حالة مشابهة في بعد أحداث 11 أيلول/سبتمبر حينما سعت الحكومات إلى شراء كمّيات كبيرة من السيبروفلوكساسين ciprofloxacin، وهو مضاد حيوي مفيد في معالجة الجمرة الخبيثة. وقد خفَّضت الشركة المالكة لبراءة الاختراع Bayer السعر الذي قدّمته إلى الولايات المتحدة تخفيضاً ملحوظاً، إلا أن المصنِّعين غير المنضوين تحت العلامة المسجلة، ومنهم الشركة الكندية Apotex، عرضوا الدواء بسعر أقل كثيراً، برغم أن Bayer حاولت منعهم. والسؤال الذي تثيره هاتان الحالتان، إن وُجد، هو متى تُعطى الصحة والفائدة العموميتان أفضلية على براءات الاختراع وعلى القيود الأخرى. وإذا بدأت التِقانة النانوية بتوفير علاجات السرطان، أو حتى المضادات الفيروسية الشاملة، تغدو هذه الأسئلة أكثر أهمية.

إضافة إلى مسألة التسجيل اختراعاً، سوف تنطوي التِقانة النانوية على مضامين اجتماعية وسياسية دولية. لقد أوجدت الثورة الصناعية الأولى انقسامات هامة بين الاقتصادات الصناعية وما كان يُسمّى الدول المتخلفة أو الدول القليلة التطور أو دول العالم الثالث. ويعود هذا جزئياً إلى أن الدول الصناعية تستطيع إنتاج سلع بتكلفة أقل، وهي أكثر غنى. يُضاف إلى ذلك أن ثمة عائقاً هائلاً في وجه الدخول إلى التصنيع، لأن على الدول أن تستثمر في التعليم والبُنية التحتية والإصلاح السياسي وتطبيق القانون ومرافق التصنيع الحديثة. ورأس المال اللازم لتحقيق ذلك يأتي عموماً من أُمم تحوّلت فعلاً إلى أُمم صناعية. لذا يمكن للاقتصادات البازغة أن تجد نفسها مدينة للبلدان التي أصبحت غنية، وهذه هي الحجة التي أدّت إلى المواجهات التي امتدت من أيام الثورة الكوبية حتى

الاحتجاجات المعارضة للعولمة في سياتل. ويمكن للتِقانة النانوية أن تزيد من ذلك الانقسام بين الأمم الغنية والفقيرة. ويمكن حتى أن تقضي على المزايا التي تتمتع بها البلدان الغنية بموارد طبيعية مثل النفط، لأنها يمكن أن تجعل تركيب الموادّ وتحويل الطاقة الشمسية الرخيصين ممكنين. من ناحية أخرى، إذا تبيَّن أن التصنيع النانوي أرخص وأسهل إدارة من تقانات التصنيع الحالية (كما هو الحال في تِقانة المعلومات التي نجحت في أمكنة مثل الهند)، فمن الممكن أن يقلِّص الفجوة بين الأغنياء والفقراء، أو يستطيع على الأقل أن يجعل الناس في شتى أنحاء العالم يحصلون على حاجاتهم الأساسية بسهولة أكبر.

أما من الناحية التقنية، فقد لفتت التِقانة النانوية فعلاً انتباه الكثيرين بتطبيقاتها الدفاعية وفي صنع الأسلحة. ويمكن لهذه التطبيقات أن تتضمّن مدرّعات أفضل واتصالات ميدانية محسَّنة. غير أن لكل تطبيق وجهاً آخر تجدر معاينته. على سبيل المثال، تقوم الموادّ النانوية الفائقة القوة، ومنها الأنابيب النانوية، على الكربون في المقام الأول. وهذا يعني أنه لا يمكن كشفها باستعمال كواشف المعادن أو «الشمامات» الكيميائية. والطريقة الوحيدة للقبض على شخص يهرِّب سلاحاً من هذا النوع على متن طائرة أو إلى مبُنى هي التفتيش الشخصي الشامل. حتى إن ثمة تطبيقات أخرى أكثر شراً، تزخر بها الصفحات السوداء لروايات الخيال العلمي، يمكن أن تصبح ممكنة. فمثلاً، قد تسعى بعض التنظيمات إلى إيجاد فيروسات تستهدف أناساً ذوي خصائص جينية معيّنة، أو حتى تفصيل فيروس لشخص مُعيَّن. إن المقدرة على استهداف مجموعات معيّنة بهذه الأسلحة الحيوية ليست واضحة، إلا أنه من المؤكد أن القادة الذين لا يتورّعون عن القيام بالإبادة الجماعية لن يترددوا في الحصول عليها. وباستعمال التِقانة النانوية، وخلافاً للأسلحة الحيوية الحالية، ليس ثمة من مبرر للاعتقاد بأن تخبئة الفصائل الفيروسية أو الموادّ المحظورة الأخرى تمنع الباحث من الحصول عليها. فهو يستطيع إيجادها من لا شيء، من حيث المبدأ، لأن الموادّ الخام اللازمة ليست نادرة كندرة اليورانيوم المخصّب.

تبدو هذه الأفكار المقلقة غير منطقية إلى حد ما، وهي بالتأكيد ضئيلة الاحتمال، إلا أن القضية الأساسية للعمل عند سُلَّم مقاسات يمثِّل أساس الحياة هي أنه قد يؤدي إلى مشاكل أخلاقية جوهرية. فثمة فعلاً قدر هائل من الخشية الأخلاقية من استنساخ الإنسان والحيوانات. والجدل الدائر حول هذه المسألة،

وحول الخلايا الجذعية، الذي يتساءل عن الجانب الأخلاقي في التضحية بالحياة ما قبل الجنينية بُغية إيجاد علاجات يمكن أن تُطيل أعمار الناس الذين يعانون أمراضاً مثل الألزهايمر وباركنسون والسكر الشبابي أو الأمراض التدهورية الأخرى وتحسِّن من حياتهم، جعل الرئيس بوش يستشير القادة الروحيين والأخلاقيين والسلطات العلمية أيضاً لوضع سياسة لهما. إنه لمن النادر أن يتدخَّل الرئيس مباشرة في تحديد الاتجاه الذي يجب أن يتخذه مجال ما من البحث العلمي. والعبارات التي تتضمّن كلمات من قبيل «إلهي أو مقدّس»، النادرة جداً في المقالات العلمية، بيَّنت أن الجدل حول التقانتين النانوية والحيوية أكثر إثارة للغيظ من البحث الذي يسعى إلى إيجاد عناصر جديدة أو كشف كواكب جديدة(*)، أو حتى إيجاد طرائق جديدة لإحداث التفاعلات النووية. وهذه هي بدايات الجدل الكبير الذي سوف يأتي. إن تِقانة تحليل الدنا المتقدمة، التي طورَّتها شركات من قبيل Affymetrix (التي تستضيف نقاشات أخلاقية في موقعها في الوب) وAgilent، لا تساعد فقط على كشف البصمات الجينية للأمراض، بل تمكِّن أيضاً من فرز الأجنّة الأصحاء أو كشف استعداد الشخص للإصابة بالمرض. ومن الواضح أن هذه المعلومات سوف تكون هامة لشركات التأمين وأصحابها. وهي قد تُشعل الجدل حول الإجهاض ثانية وتثير النقاشات حول حق الفرد بالخصوصية، لكنْ هذه المرة في ما يخصّ بياناته الجينية. وقريباً سوف تصبح الهندسة الجينية، المختلَف عليها فعلاً في مجال النباتات والبقول، ممكنة التطبيق على الإنسان. والسؤال الجوهري عن المدى الذي يمكننا الوصول إليه في تغيير أنفسنا يجب أن يكون موضع نقاش.

حتى إن ثمة جوانب مقلقة أشد صلة بالمستقبل سوف تنشأ أيضاً بسبب التِقانة النانوية. فمن المرجَّح أن صيغاً من الحَوْسَبة النانوية التي ناقشناها (الحَوْسَبة الكمّومية، الحَوْسَبة بالدنا، الحَوْسَبة بالإلكترونيات النانوية) يمكن أن تساعد على فك قيد الذكاء الصنعي الحقيقي. فإذا حصل ذلك، فكيف يجب أن نعامل الذكاء الصنعي؟ وما هي الحقوق والامتيازات التي يجب أن تمتلكها الآلات الذكية؟ وماذا يحصل إذا أصبحت ذاتية التكاثر؟ وإذا تحسَّنت الملتقيات بين البشر والحواسيب إلى حد يصعب عنده التمييز بينهما، فماذا

(*) من باب أن ثمة متديّنين يرون في ذلك خروجاً عن طاعة الخالق (المترجم).

يعني ذلك للحضارة الإنسانية؟ كيف سنتعامل مع هؤلاء البشر الآليين؟ هل تكون هذه هي المرحلة التالية من تطوُّر وارتقاء الجنس البشري؟ هل تمكِّن من التمديد اللامحدود للحياة من خلال استعمال الأعضاء أو الأجساد الصنعية؟ حتى لو أخفقت الحَوْسَبة النانوية في إنتاج آلات تفكِّر، فإن أحد أهدافها المعلنة هو كسر التعمية. فإذا أثمر هذا، فإن كل الصيغ الشائعة للتعمية الرقمية، من تلك التي تحمي التجارة الإلكترونية حتى تلك التي تحمي الأسرار النووية، سوف تُكسر. وعواقب ذلك على الأمن القومي والخصوصية الشخصية لا تحتاج إلى تفصيل.

إنها أسئلة مثيرة ومقلقة، وقد حان الوقت للبدء بمعالجتها في مكان آخر غير شاشة التلفاز وصفحات روايات الخيال العلمي. إن الجدل الأخلاقي الدائر حول التِقانة النانوية هو واحد من أكثر المبرّرات أهمية ليعرف الجمهور ما هو النانو وماذا يمكن أن يعني. والتِقانة النانوية بطبيعتها علم متعدد الاختصاصات. ولعلنا لا نحتاج في الجدل حولها إلى العلماء والمهندسين فقط، بل إلى المفكرين والأخلاقيين والمحامين والمهتمين بشؤون الدين، إضافة إلى السياسيين.

لقد أصبحتَ الآن تعرف شيئاً عن فوائد التِقانة النانوية والمخاطر المحتملة فيها، فأهلاً بك في المناظرة بشأنها.

الملحق (أ): بعض المصادر الجيّدة للتِقانة النانوية

«ثمة وقت لبعض الأشياء، ووقت لكل الأشياء. ووقت للأشياء العظيمة، ووقت للأشياء الصغيرة».

ميغل دي سرفانتيس سافيدرا Miguel de Cervantes Saavedra

أخبار ومعلومات مجّانية في الإنترنت

توجد في كثير من مواقع الوِب معلومات عن العلم والتِقانة النانويين. ويجري تحديث بعضها بانتظام، ولبعضها طابع التقرير. وكثير منها مفاجئ ومثير ويحتاج هضمه إلى قليل من الملح. وفي ما يلي لائحة بالمواقع التي وجدناها أكثر فائدة.

كتاب التِقانة النانوية: NanotechBook <http://www.nanotechbook.com> www.nanotechbook.com. الموقع الرسمي للكتاب، وهو يحتوي على وصلات إلى مواقع جيدة أخرى وإلى مراجع الكتاب، إضافة إلى معلومات عن نقاشات جارية في الإنترنت عن التِقانة النانوية.

تايمز الصغيرة: <http://www.smalltimes.com> www.smalltimes.com. موقع جيد لتحرير الأخبار يُركِّز الاهتمام على الهندسة الإلكتروميكانيكية المكروية، والمنظومات المكروية، والتِقانة النانوية. وهو أيضاً بيت Small Times Stock Index.

تِقانة ساينتيفيك أميركان النانوية: <http://www.sciam.com/nanotech> www.sciam.com/nanotech. يُعتبر هذا الموقع التابع لمجلة العلوم الأميركية Scientific American من المصادر الممتازة لأخبار النانو العلمية العاجلة.

المبادرة القومية للتِقانة النانوية: <http://www.nano.gov> www.nano.gov. يحتوي على نظرة إجمالية إلى برنامج الحكومة الاتحادية الأميركية

بشأن التِقانة النانوية، وعلى وصلات إلى بعض المصادر التعليمية الجيدة.

نشرة التِقانة النانوية: www.nanotechbulletin.com <http://www.nanotechbulletin.com>. يحتوي هذا الموقع على مقابلات مع أصحاب العقد والحل في التِقانة النانوية. إذا كنت ترغب في الاستماع إلى ما يقوله الخبراء في هذه الصناعة، فإن هذا الموقع يمثِّل مصدراً جيداً.

تحالف الأعمال النانوية: www.nanobusiness.com <http://www.nanobusiness.com>. مصدر جيد لأولئك المهتمين بجانب الأعمال والسياسة في صناعة النانو. وهو أيضاً موقع جيد لمعرفة المناسبات والمؤتمرات ذات الصلة بالتِقانة النانوية.

التِقانة النانوية الآن: www.nanotech-now.com <http://www.nanotech-now.com>. بوّابة إلى وصلات إلى مواقع جيدة أخرى عن التِقانة النانوية.

كوكب التِقانة النانوية: www.nanotechplanet.com <http://www.nanotechplanet.com>. موقع جيد آخر لعناوين الأخبار، وهو بوّابة أيضاً، لكنه يمكن أن يمزج النانو مع المكرو مع أخبار ذات صلة بهما جزئياً. وهو يحتوي أيضاً على ملفّ خاص بالتِقانة النانوية وباجتماعات تخصها.

رؤوس الأموال المغامرة المهتمة بالتِقانة النانوية

بدأت التِقانة النانوية بالاستحواذ على اهتمام جدّي من شركات رأس المال المغامر، ويجري تأسيس بعض الشركات لمجرد المشاركة في الحدث. وفي ما يلي لائحة مختصرة بشركات رأس المال المغامر التي تبحث عن مقترحات بشأن التِقانة النانوية، أو استثمرت في شركات تِقانة نانوية، أو كانت نشطة في تشجيع التِقانة النانوية. وليس المقصود بهذه اللائحة تزكية أي من الشركات أو التوصية بالتعامل معها. فثمة الكثير غيرها، ومن المؤكَّد أن اللائحة سوف تستمر بالنمو مع ظهور مزيد من المنتجات العملية.

AGTC Funds: www.agtcfunds.com

Angstrom Partners: www.angstrompartners.com

ARCH Venture Partners: www.archventure.com

Ardesta: www.ardesta.com

Ben Franklin Technology Partners: www.sep.benfranklin.org

Bessemer Venture Partners: www.bvp.com

Capital Stage Nano: www.capitalstagenimo.comjen
CW Group: eee.cwventures.com
Draper Fisher Jurvetson: www.drapervc.com
Evolution Capital: www.evolution-capital.com
Galway Partners: www.galway.com
Harris & Harris Group: www.hhgp.com
Illinois Partners: www.illinoispartners.com
Lux Capital: www.luxcapital.com
McGovern Capital: www.mcgoverncapital.com
Morgenthaler Ventures: www.morgenthaler.com
Polaris Venture Partners: www.polarisventures.com
Portage Ventures: www.portageventures.com
Sevin Rosen Funds: www.sevinrosen.com
Tribal Weave: www.tribalweave.com
Venrock Associates: www.venrock.com

الثبت التعريفي

ملاحظة: المقصود بهذه التعاريف أن تكون سهلة التناول، لا كاملة. ولذا اقتصرت على المعاني الخاصة التي استُعملت الكلمة للتعبير عنها في هذا الكتاب، وقد جرى تبسيطها لتحقيق الوضوح.

استجهار إلكتروني (**Electron Microscopy**): قياس بُنى الأجسام الصلبة والسطوح باستعمال الإلكترونات عوضاً عن الضوء لرؤية الأشكال الصغيرة (وصولاً حتى السلَّم النانوي).

استفحال (**Metastasis**): سيرورة انتشار أنواع معيّنة من السرطان من جزء من الجسم إلى آخر.

آلة محدودة الحالات (**Finite State Machine**): تجهيزة تعمل بالانتقال بين سلسلة من الحالات وفقاً لمجموعة من القواعد (انظر **قواعد الانتقال**). من أمثلة الآلة محدودة الحالات جهاز التحكُّم بمصعد. تمثّل كل وضعية للمصعد (الطابق الأول، الطابق الثاني..إلخ) حالة، وتُرمَّز طريقة استجابة المصعد إلى كبسات المستعملين على شكل قواعد انتقال.

إلكترون (**Electron**): جُسَيْم دون ذرّي يمتلك شِحنة سالبة واحدة وكُتلة تساوي 20000/1 من كتلة البروتون تقريباً.

إلكترونيات جُزَيْئية (**Molecular Electronics**): إلكترونيات تعتمد على الترتيب الجُزَيْئي أو تستعمله.

أليف للماء (**Hydrophilic**): صفة لموادّ أو بُنى جُزَيْئية تؤثِّر بقوة في الماء وتتأثَّر به وتنحلّ فيه (كحول الإثيل، مثلاً).

أنبوب نانوي (Nanotube): أنابيب كربونية على الأغلب، وهي أسلاك من الكربون الصافي تبدو كصفائح الغرافيت الملفوفة أو أنبوبة شرب الكولا.

إنزيم (Enzyme): مُحفِّز تفاعل بروتيني يُستعمل لتسهيل التفاعلات الكيميائية في الأجناس الحيوية.

أنَيْبوب مكروي (Microtubule): بُنية أُنبوبية خطية طويلة توجد في الخلايا، وتُستعمل في المحرّكات الجُزَيئية لتحريك مجموعات من الجُزَيئات أو البُنى الأخرى ضمن الخلِيّة.

أوليغونوكليوتيد (Oligonucleatide): وحدات جزئية صغيرة من الدنا تتألف من بضع أُسس على كل من الشريطين المهجَّنين. «أوليغو» تعني «بضعة».

برستين (Prestin): بُنية محرّك جزئية موجودة في الأُذن الداخلِيّة وتعمل على تحويل الصوت إلى إشارة عصبية.

بروتون (Proton): جُسَيْم دون ذرّي ذو شِحنة كهربائية موجبة واحدة وكتلة تقلّ قليلاً عن كتلة ذرّة الهدروجين. يحدِّد عدد البروتونات في نواة ذرّة معيّنة نوع العنصر الذي تمثله الذرّة.

بروتين (Protein): جُزَيء حيوي كبير يتجمَّع من وحدات حموض أمينية. تمثِّل البروتينات البُنى الوظيفية في العالَم الحيوي.

بصريّات(*) (Optics): علم الضوء وانتشاره وتفاعله مع المادة.

بلمرة (Polymerization): سيرورة صُنع بوليمر من مونومرات لتكوين جُزَيئات كبيرة جداً من أسلاف جُزَيئية صغيرة.

بُنية حيوية نانوية المقاس (Nanoscale Biostructure): بُنية حيوية تتغيَّر خواصُّها المميَّزة في سُلَّم النانومتر (جدار الخلِيّة مثلاً).

(*) استخدمنا الكلمة «بصريّات» للتعبير عن الكلمة «optics» لوصف الحالات التي تحصل فيها معالجة للضوء بالعدسات والمواشير وغيرها من الأدوات البصرية، باستثناء حالة الـ fiber optics التي شاع استعمال «الألياف الضوئية» في مقابلها (المترجم).

بُنية ذاتية الالتئام (Self Healing Structure): نوع من الموادّ الذكية التي تستجيب بُنيتها للإجهاد الفيزيائي أو الكسر أو التصدُّع بترميم نفسها لتعود إلى حالتها الأصلية.

بُنية لامتجانسة (Inhomogeneous Structure): مادة تراكيب أجزائها المختلفة مختلفة. ومن أمثلتها في سُلَّم الأشياء الكبيرة البيض المقلي والإسمنت المسلَّح.

بُنية نانوية (Nanostructure): بُنية تقع مقاساتها المميِّزة في السلَّم النانوي.

بوّابة منطقية (Logic Gate): أيٌّ من البُنى المنطقية الأساسية التي حينما تُضمّ معاً تمكِّن من الحَوْسَبة الرقمية. وأكثر ثلاث بوّابات انتشاراً هي بوّابة التقاطع AND، وبوّابة الاجتماع OR، وبوّابة النفي NOT. وأول من ناقش البوّابات المنطقية هو جورج بُول George Boole.

بوليمر (Polymer): جُزَيء كبير يُصنع بربط وحدات جزئية معاً تُسمّى مونومرات. من أمثلة البوليمرات البولي إثيلين والدنا.

بوليمر كاسر للضوء (Photorefractive Polymer): مادة بوليمرية تنقل الكهرباء وتتصف باستجابة بصرية لاخطيّة. يمكن باستعمالها قراءة وكتابة أشكال المعلومات.

بوليمر لامتبلور (عديم الهيئة) (Amorphous Polymers): بوليمر لا يشكِّل بُنى بلّورية، بل بُنى غير منتظمة في طور صلب (البوليستيرين في الأكواب مثلاً).

بوليمرات متشابكة (Cross-Linked Polymer): بُنى مكوَّنة من خيوط بوليمرية ذات روابط كيميائية بينها تعمل على ربط خيط بجاره.

ترانزستور المفعول الحقلي (Field Effect Transistor): أكثر أنواع الترانزستورات استعمالاً في الشرائح المكروية. يحتوي على بوّابة للتحكُّم (فصل ووصل) بواسطة جهد كهربائي.

ترشيح بالغ النعومة (Ultrafiltration): ترشيح الجُسيْمات الصغيرة جداً (المكروية). ليس هذا المصطلح دقيقاً، فالبعض يستعمل أحياناً مصطلح الترشيح النانوي بمعنى الترشيح البالغ النعومة.

ترشيح نانوي (**Nanofiltration**): ترشيح الجُسَيْمات النانوية المقاس.

تركيب ضوئي (**Photosynthesis**): السيرورة التي تحوِّل بها النباتات طاقةَ الضوء إلى طاقة كيميائية أو طاقة لتركيب الجُزَيئات أو إحداث تدرُّج بروتوني. وهي الوسيلة الأساسية التي تُغذِّي بها الشمس جميع موارد الطاقة تقريباً.

تركيب ضوئي صُنعي (**Artificial Photosynthesis**): استعمال البُنى الجُزَيئية أو ذات الحالة الصلبة لتقليد التركيب الضوئي الطبيعي باستخدام ضوء لتوليد تيار كهربائي. يُعتبر التركيب الضوئي الطبيعي طريقة للتجهيزات الكهرضوئية.

تركيب نانوي (**Nanoscale Synthesis**): تعبير آخر عن التصنيع النانوي، ويُقصد فيه صُنع البُنى في السلَّم النانوي.

تشابك (**Entanglement**): عملية في الحَوْسَبة الكمّومية تجمع بين معلومتين منفصلتين بحيث يمكن معاملتهما معاملة كينونة أُحادية.

تصميم بمساعدة الحاسوب (**Computer Aided Design CAD**): استعمال خوارزميّات وأدوات حاسوبية لتصميم البدّالات والحواسيب والذواكر وغيرها من التجهيزات التقانية.

تصنيع نانوي (**Nanofabrication**): تصنيع أو تحضير البُنى النانوية.

تصنيع نانوي صعودي (**Bottom-Up Nanofabrication**): بناء البُنى النانوية ابتداء بمكوِّنات صغيرة من قبيل الذرّات أو الجُزَيئات.

تصنيع نانوي نزولي (**Top Down Nanofabrication**): سيرورة صُنع البُنى النانوية ابتداء من بُنية كبيرة تُنحت حتى الوصول إلى البُنية المطلوبة. إنها شبيهة بالنحت وبصناعة شرائح السيموس. يُقال إن مايكل أنجلو، عندما نحت تمثال داود، بدأ بكتلة من المرمر ونزع منها كل ما لا صلة له بداود.

تصوير بالرنين المغنطيسي (**Magnetic Resonance Imaging**): نوع من مطيافية الرنين المغنطيسي يدلّ على وجود نوى ذرّية معيّنة. ويُستعمل لتصوير مقاطع من الجسم أو بُنى حيوية معيّنة.

تعرُّف جُزَيئي (Molecular Recognition): طريقة أساسية للتجميع الذاتي يتصف فيها أحد الجُزَيئات بالمقدرة على الارتباط بطريقة معيّنة بجُزَيء محدّد آخر أو بسطح.

تِقانة نانوية (Nanotechnology): تطبيق علم النانو في التجهيزات التقانية.

تنمية بلّورات (Crystal Growth): تكوين بلّورات بتنميتها من محلول، وهو نوع من التجميع الذاتي. من أمثلتها تكوُّن رقائق الثلج في الجو، وتكوُّن سكّر النبات من محلول سكري، تلك السيرورة التي تُري أن الحلاوة والجمال هما من سِمات التِقانة النانوية.

تهجير كهربائي (Electrophoresis): طريقة لتطبيق الحقول الكهربائية الخارجية على أجناس مشحونة كهربائياً لتحريك الجُسَيْمات والسوائل. يُحرِّك التهجير الكهربائي العيّنات بمعدّل يتناسب عكساً مع كتل مكوِّنات العيّنة، ولذا يُستعمل غالباً لفصل المكوِّنات عن بعضها البعض. قارن **بالنضح الكهربائي**.

تهجين (Hybridization): هو في علم الدنا تكوين شريط ثان من الشريط الأول بالربط المتمم الذي يربط G بـ C أو A بـ T.

توافر حيوي (Bioavailability): تُستعمل العبارة لوصف التوافر المحلّي، ضمن كينونة حيوية كبيرة من قبيل جسم الإنسان، لدواء مُعيَّن أو جُزَيئات علاج.

ثُنائي الاستقرار(Bistable): منظومة ذات حالتي استقرار، ومثالها قطعة نقد معدنية تستقر على أحد وجهيها.

ثُنائي مشعّ للضوء (Light Emitting Diod): بُنية يتّحد فيها إلكترون مع ثُقب لتكوين حالة متهيِّجة تشعّ ضوءاً. تحوِّل هذه التجهيزات الكهرباء إلى ضوء مباشرة.

جُزَيء كبير (Macromolecule): تسمية أخرى للبوليمر، وتدلّ على جُزَيئات أُحادية تتألف من كثير (ألوف أو أكثر) من الذرّات.

جسم مضادّ (Antibody): بروتينات يُنتجها الجهاز المناعي لتحييد أو تدمير العوامل المُمرِضة.

جنس (Species): تدلّ في الكيمياء على ذرّة أو شاردة أو بُنية معيّنة.

حامل الحديد (سدروفون) (Siderophore): جُزَيء صغير يحتوي على الأكسجين والنتروجين والكبريت أو ذرّات فوسفورية يمكن أن تتحد (أو تلتقط) شوارد معدنية معيّنة.

حَوْسَبة بالدنا (DNA Computing): استعمال تهجين الدنا وسيرورات تضاعفه لحل مسائل حاسوبية.

حَوْسَبة سِربية (Swarm Computing): بُنيان حاسوبي يقوم على عدد كبير جداً (سِرب) من المعالجات البسيطة بدلاً من العدد الصغير من المعالِجات المعقدة. يمكن لكل معالج أن يقوم ببضعة مهام أساسية، ويمكن له أن يُخفق دون أن يؤدي ذلك إلى اضطراب النظام. أما الخوارزميات السربية فهي معقدة وتُصمَّم بالاستفادة من محدودية قوة العنصر الحاسوبي واحتمال إخفاقه.

حَوْسَبة عديمة الهيئة (Amorphous Computing): انظر الحَوْسَبة السربية.

حَوْسَبة عميمة (Pervasive Computing): رؤية مستقبلية يحصل فيها التحكُّم الحاسوبي في جميع أوجه الحياة، من أقفال الأبوّاب وأفران المطابخ ومعاطف المطر حتى المرطِّبات.

حَوْسَبة كمّومية (Quantum Computing): طريقة حَوْسَبة تقوم على الخواصّ شبه الموجية للمادة، وتعمل على نحو مختلف جوهرياً عن الحَوْسَبة الرقمية.

حُوَيصلة نقل (Liposome): قُطَيْرة صُنعية مكروية أو نانوية المقاس تتألف من طبقات من الشحوم أو الشحوم الفوسفورية التي تغلّف نواة مائية. ويمكن استعمالها نموذجاً للأغشية وعربةَ نقل لجُزَيئات معيّنة أو لبُنى حيوية.

خلِيّة غريتسل (Graetzel Cell): خلِيّة كهرضوئية ابتكرها مايكل غريتسل Michael Graetzel في سويسرا، ويُستعمل فيها ثنائي أكسيد التيتانيوم النانوي مع مادة عضوية ملوّنة للحصول على تيار كهربائي من الضوء الساقط عليها.

خلِيّة كهرضوئية (Photovoltaic Cell): منظومة صُنعية تحوِّل طاقة الضوء إلى طاقة كهربائية. وهي تقوم على بُنية نصف ناقلة أو على تجمُّعات جُزَيئية.

رابطة هدروجينية (Hydrogen Bond): نوع مُعيَّن من الربط الضعيف بين الجُزَيئات توفّره ذرّات هدروجين تربط، مثلاً، ذرّة أكسجين ترتبط بها تكافئياً مع ذرّة أكسجين أخرى تتأثر بها وتؤثر فيها على نحو أضعف بواسطة قوى كهربائية. إن الروابط الهدروجينية بالغة الأهمية لبُنية الماء والبروتينات والدنا.

روتاكسان (Rotaxane): بُنية جُزَيئية متداخلة ميكانيكياً مكوَّنة من جُزَيء له شكل المغزِل محشور في بُنية حَلَقية الشكل.

زيوليت (Zeolite): مادة سيراميكية عامة تُصنع من أكسيد الألمنيوم أو أكسيد السليكون مع إضافات من موادّ أخرى. تُستعمل لتطرية المياه وتحفيز التفاعلات الكيميائية، وهي تضم مجموعة مغرية جداً من الموادّ النانوية.

سِلك نانوي (Nanowire): اسم آخر للقضيب النانوي، خاصة الناقل للكهرباء.

سُلَّم النانو (Nanoscale): سُلَّم المقاسات ما بين 1 و100 نانومتر.

سوائليات مكروية (Microfluidics): عملية نقل السوائل أو الموائع على طول قناة يقدَّر مقاس مقطعها العرضاني بالمكرونات.

سوائليات نانوية (Nanofluidics): سيرورة نقل السوائل أو الموائع المتحركة عبر قناة مقطعها العرضاني نانوي المقاس.

سيراميك (Ceramic): مادة حرارية قاسية تقوم على الأكاسيد غالباً.

سيموس (Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)): نصف ناقل متمم أكسيد المعدن. تُستعمل الكلمة للإشارة إلى تِقانة شائعة الاستعمال في صناعة شرائح السليكون المكروية.

شاردة (Ion): ذرّة أو جُزَيء مشحونان كهربائياً.

طباعة (Lithography): تكوين بُنى من أي حجم (حتى السلَّم النانوي) بنقل الشكل من بُنية إلى أخرى.

طباعة باقتلاع الكُرات النانوية (Nanosphere Lift Off Lithography): طريقة

تصنيع نانوي تُستعمل فيها كُرات نانوية المقاس لتكوين شكل على سطح، ويعمل هذا السطح بعدئذ على سدّ بعض مناطق السطح أثناء التوضيع التالي للمادة النانوية من طور بُخاري. وهي نسخة نانوية من لوحة الأحرف المفرَّغة التي تُستعمل لرسم الإشارات بالبخّ.

طباعة بالحُزمة الإلكترونية (**Electron Beam Lithography**): طريقة تصنيع تستعمل الحُزَم الإلكترونية لتكوين بُنى على السطوح، وتُستعمل على نطاق واسع لصنع بُنى نانوية كبيرة موسَّعة.

طباعة مكروية بالكبس (**Micro Imprint Lithography**): طريقة طباعة لصنع بُنى صغيرة (مكروية في الأصل، والآن نانوية المقاس على نطاق واسع) باستعمال نوع من وسادة حبر تُصنع عادة من مادة لدِنة.

طباعة نانوية بالقلم الغاطس (**Dip Pen Lithography**): طريقة تصنيع يُستعمل فيها رأس مِجَسٍّ ماسح يعمل من حيث المبدأ مثل القلم الذي يُغطّس في المِحبرة ثم يُخرَج لرسم بُنى نانوية على السطوح باستعمال بُنى جُزَيئية ما بوصفها حبراً.

عازل (**Insulator**): مادة لا تنقل الكهرباء (من أمثلتها المطّاط المغلّف للأسلاك الكهربائية).

عامل مُمْرِض (**Antigen**): مادة غريبة تدخل الجسم وتؤدي إلى مرضه.

علم النانو (**Nanoscience**): تخصُّص علمي يعمل فيه مؤلفا هذا الكتاب، وينطوي على الفهم والاستقصاء العلميين للظواهر في السلَّم النانوي.

فِرمون (**Pheromone**): مادة كيميائية تفرزها الحشرات وبعض الحيوانات وتؤثر في سلوك أقرانها من النوع نفسه، ومن أمثلة ذلك الجذب الجنسي أو التنبيه إلى المخاطر.

فك التماسك (**Decoherence**): إزالة التشابك المتحكَّم فيها. على سبيل المثال، حينما تنفصل قطعتان متشابكتان من المعلومات (في الحَوْسَبة الكمّومية) بضياع الطور النسبي بينهما، يُقال إن تماسكهما قد انفك.

قانون أوم (Ohm's Law): القانون الأساسي لتدفق الشِحنة الكهربائية في الدارات الكهربائية في سلَّم الأشياء الكبيرة، وينصّ على أن شدّة التيار تساوي الجهد مقسوماً على المقاومة.

قانون كولون (Coulomb's Law): القانون الأساسي للقوة الكهربائية: تتناسب القوة بين شِحنتين طرداً مع قيمتيهما وعكساً مع مربّع المسافة الفاصلة بينهما.

قضيب نانوي (Nanorod): بُنية نانوية ذات شكل كشكل العود أو الوتد، قطرها نانوي المقاس، وطولها أكبر من قُطرها كثيراً.

قواعد الانتقال (Transition Rules): مجموعة من التعليمات تأمر آلة محدودة الحالات (نوع من الحاسوب) بالانتقال من حالة معيّنة (حالة فصل أو وصل مثلاً) إلى حالة أخرى. من أمثلة قواعد الانتقال «اعمل حين ضغط قاطع التغذية».

كهركيمياء (Electrochemistry): العلم الذي يجمع بين الكيمياء وتدفّق التيار الكهربائي. من أمثلة السيرورات الكهركيميائية الطلي بالفضة وتصنيع الألمنيوم.

كوليسترول (Cholestrol): جُزَيء كبير شديد الشيوع في العالَم الحيوي (يمثِّل جزءاً كبيراً من كتلة الكبد والدماغ لدى الإنسان)، وهو نفور من الماء.

كوينون (Quinon): جُزَيء عُضوي صغير يحتوي على رابطة مزدوجة بين الكربون والأكسجين. والكوينونات هامة بوصفها أجناس قابلة وسيطة في بُنى التركيب الضوئي.

كيوبت (Qbit): أصغر وحدة للمعلومات في الحَوْسَبة الكمّومية.

لصيقة متلألئة (Luminescent Tag): جُزَيئات أو بُنى نانوية تتلألأ (تشعّ ضوءاً) حين إضاءتها، وتُستعمل لتعريف البُنى التي تُلصق بها.

لَوْلَب قضباني (Rodcoil): جُزَيئات متوسطة المقاس تحتوي على ما بين مئات وألوف الذرّات المرتّبة على شكل ذيل جاسئ ورأس منتفخ نفور من الماء. وهي تتجمَّع ذاتياً في بُنى دائرية وأسطوانية كبيرة.

مادة خاملة حيوياً (Bio-Inert Materials): مادة لا تتفاعل مع البيئة الحيوية، ولا يرفضها الجهاز المناعي في جسم الإنسان عادة.

مادة مركَّبة نانوية (**Nanocomposite**): بُنية متعددة المكوِّنات ذات المقاسات النانوية، ومن أمثلتها أنابيب الكربون النانوية ضمن حاضنة لدِنة طرية.

مادة نانوية مغلّفة (**Encapsulated Nanomaterial**): بُنى تكون فيها مادة نانوية مغلّفة بغطاء أو غِشاء خارجي.

مانع انتحار (**Suicide Inhibitor**): جُزَيء تركيبي يُنتِج حين تفاعله مع إنزيم مادةً ترتبط بالإنزيم وتوقفه عن أداء وظيفته (تجعله ينتحر وظيفياً). انظر فقرةً «التزويد بالدواء» في الفصل 8.

متعدد السكّريات (**Polysaccharides**): بوليمر وحداته الجُزَئية هي السكّريات.

مِجَس ماسح (**Scanning Probe**): أداة تُستعمل في أجهزة قياس وتحضير البُنى النانوية على السطوح، وهي تعتمد على التأثيرات المتبادلة بين بُنية رأس المسح والبُنية النانوية التي على السطح والتي سوف تُقاس أو تعالَج.

مجمَّع التقاط الضوء (**Light Harvesting Complex**): جزء من جهاز التركيب الضوئي يلتقط الطاقة الضوئية ويخزنها (على شكل حالات جُزَيئية متهيِّجة) قبل إرسالها إلى بُنى أخرى ضمن جهاز التركيب الضوئي.

مجموعة ذيل (**Tail Group**): انظر **مجموعة رأس.**

مجموعة رأس (**Head Group**): جزء من بُنية بعض الجُزَيئات الطويلة تُسمّى فيها إحدى نهايتي الجُزَيء مجموعة رأس، وتسمّى الأخرى مجموعة ذيل. في الصابون، مجموعات الرأس المحبّة للماء تنحلّ في الماء، في حين أن الذيول النفورة من الماء تسبّب الانحلال في الزيت والشحم.

مِجْهَر القوّة الذرّية (**Atomic Force Microscope**): جهاز مِجَسٍّ ماسح يقيس القوة الفاعلة في رأس حين انزلاقه فوق سطح أو تحرُّكه وهو عمودي عليه.

مِجْهَر القوّة المغنطيسيّة (**Magnetic Force Microscope**): مِجْهَر ذو مجسٍّ ماسح تدفع فيه قوة مغنطيسية رأس المجسّ كي يتحرّك. وتمكِّن هذه الحركة من قياس القوة المغنطيسية.

مِجْهَر المسح النفقي (**Scanning Tunneling Microscope**): أول أجهزة المِجَسّ

الماسح، وقد اخترعه بينِّغ ورورَر Binnig and Rohrer. وهو يعمل في السلَّم النانوي ويكشف الإلكترونات التي تمرّ نفقياً بين رأس ماسح وسطح ناقل كهربائياً.

محرّك جُزَيئي (**Molecular Motor**): بُنية نانوية معقدة (أحياناً أكبر قليلاً من البُنية النانوية) تعمل على تحويل الطاقة الكيميائية إلى حركة ميكانيكية ضمن البُنية الحيوية.

مُحِسّ حيوي (**Biosensor**): بُنية تحسُّسية تستهدف المحلَّلات الحيوية، أو مُحِسٌّ يقوم على استعمال جُزَيئات حيوية.

مُحِسّ ضوئي (**Photosensor**): هو عادة تجهيزة لقياس شدة الضوء وتردّده، وأكثر هذه المُحِسَّات انتشاراً ذات مقاسات كبيرة وتعمل بإصدار إلكترونات من معادن تتهيَّج ضوئياً. ومن أمثلتها مُحِسَّات فتح أبوّاب المصاعد في حالات الطوارئ.

محسّ قياس لوني (**Colorimetric Sensor**): مُحِسٌّ يغيِّر لونه حين ظهور المادة المحلَّلة. والمثال البسيط له هو ورق عبّاد الشمس.

مُحفِّز تفاعل (**Catalyst**): مادة تجعل التفاعل الكيميائي يحصل بسرعة أكبر. على سبيل المثال، يتبلور السكّر على قطعة خشب بسرعة أكبر من سرعة تبلوره في ماء سائل، ولذا تعمل قطعة الخشب محفِّزاً للتفاعل.

محلَّلة (**Analyte**): جنس كيميائي في محلول أو غاز يجب كشف وجوده وتحديد تركيزه أو تحسُّسهما.

مدبِّر (**Chaperone**): بروتين صغير يُستعمل ضمن الخلايا لحمل الشوارد المعدنية من مكان إلى آخر (هذا فعل تسهيلي يخالف ما يقوم به المدبِّر عادة، وهو عدم التسهيل).

مُرسِل عصبيّ (**Neurotransmitter**): جُزَيء عُضوي صغير يحمل إشارات ومعلومات من جزء من الدماغ إلى آخر.

مِطيافية (**Spectroscopy**): علم التأثير المتبادل بين الإشعاع والمادة.

معالجة جينية (**Gene Therapy**): نوع من أنواع المعالجة بالدنا.

معالجة ضوئية ديناميكية (**Photodynamic Therapy**): طريقة مداواة لعدد من الأمراض ومنها السرطان، وتعتمد على استعمال بُنى مكوَّنة من نقاط كمّومية أو نانوية لتحويل طاقة الضوء إلى حرارة أو إلى جُزَيئات أكسجين متهيِّجة شديدة التفاعل تهاجم نسيج الورم.

معالجة طبية بِجُزَيء الدنا (**DNA Molecule Therapy**): طريقة علاجية تُدخل فيها جُزَيئات الدنا إلى الخلِيّة حيث تتحد مع دنا العوامل المُمْرِضة ضمن الخلِيّة المصابة، على سبيل المثال.

مقاومة مغنطيسية عملاقة (**Giant Magneto Resistance**): ظاهرة تتغيَّر فيها مقاومة المادة الكهربائية بشدة بتطبيق حقل مغنطيسي عليها. تُستعمل آليّة للقراءة في ذواكر الحاسوب الحالية.

ملتقى عصبي إلكتروني (**Neuro Electric Interface**): بُنية تحوِّل الإشارات في ما بين الألياف العصبية والتجهيزات الحاسوبية الخارجية.

مُوارَدة (**Pipelining**): إدخال البيانات إلى سلسلة من المعالجات على التتالي بحيث يُجري عليها كل عنصر عملية ما لتخرج منه إلى العنصر التالي، وهكذا دواليك، على غرار خط الإنتاج الذي تُضاف في كل مرحلة منه إلى المنتَج قطعة مختلفة.

مونومر (**Monomer**): واحد من جُزَيئات صغيرة ترتبط معاً لتكوين بُنى أكبر هي البوليمرات.

ميكانيك كمومي (**Quantum Mechanics**): علم يصف السلوك الميكانيكي للجُسَيْمات الذرّية ودون الذرّية التي من قبيل الإلكترونات والبروتونات. وهو تعميم للميكانيك العادي الذي يتعامل مع كرة السلّة وحدوة الحصان.

ناقل جُزَيئي (**Molecular Conductor**): جُزَيء يستطيع نقل الكهرباء.

نترون (**Neutron**): جُسَيْم دون ذرّي عديم الشِحنة الكهربائية وذو كتلة أكبر قليلاً من كتلة البروتون. ويمكن اعتبار أنه مكوَّن من بروتون وإلكترون متحدين معاً.

نسخ مرآتي (**Mirroring**): طريقة لجعل البيانات متماثلة في عدة وسائط خزن رقمية من قبيل أقراص الحاسوب الصلبة.

نضح كهربائي (**Electroosmosis**): طريقة لتحريك السوائل باستعمال الحقل الكهربائي. ينقل النضح الكهربائي العيّنات بمعدّل ثابت، ولذا يُستعمل حينما يجب ألاّ تنفصل العيّنة إلى مكوِّناتها. قارن **بالتهجير الكهربائي**.

نُظُم إلكتروميكانيكية مكروية (**Micro Electro Mechanical Systems**): بُنى مكروية المقاس تحوِّل الإشارات الإلكترونية إلى ميكانيكية أو الميكانيكية إلى إلكترونية.

نفور من الماء (**Hydrophopic**): موادّ تكره الماء ولا تنحلّ فيه (زيت الطعام، مثلاً).

نُقطة كمّومية (**Quantum Dot**): بُنية نانوية ذات شكل كروي أو تكعيبي تقريباً، وهي صغيرة إلى حد يكفي لتُبدي سلوكاً كمّومياً مميَّزاً في السيرورات الضوئية والكهربائية.

نُقطة نانوية (**Nanodot**): جُسَيم نانوي يتكوَّن من مادة متجانسة ذات شكل كروي أو أسطواني تقريباً.

هندسة البروتينات (**Protein Engineering**): صُنع ومعالجة البروتينات بالطرائق التركيبية الكيميائية.

هيستامين (**Histamin**): جُزَيء صغير موجود في الجسم دائماً، إلا أن تركيزه يزداد بوجود العوامل المُمرِضة والأجسام المضادة.

ثَبْت المصطلحات: عربي ـ إنجليزي

استجهار أو ميكروسكوبية	microscopy
إلكترونيات جُزَيئية	molecular electronics
إلكترونيات نانوية	nanoelectronics
تجميع ذاتي	self-assembly
تحليل لوني	Colorimetry
تدويم (سبين)	spin
تشابك	entanglement
تصنيع نانوي	nanofabrication
تصوير بالرنين المغنطيسي	magnetic resonance imaging
تعمية، تشفير	cryptography
تِقانة نانوية	nano technology
تهجير كهربائي	electrophoresis
توافر حيويّ	bioavailability
ثلاثي فوسفات الأدِنوزين	adenosine triphosphate ATP
جَسِيم	bulky
حَوْسَبة سِربية	swarm computing
حَوْسَبة عديمة الهيئة	amorphous computing
حَوْسَبة عميمة	pervasive computing
حَوْسَبة كمومية	quantum computing

stock index	دليل الأسهم
code	رِماز
imprint	سكّ
nanoscale	سُلَّم نانوي
fluidics	سوائليات
ion	شاردة
charge	شِحنة
net charge	شِحنة صافية
bottom up	صعودي
sphere lift off lithography	طِباعة باقتلاع الكُرات
e-beam lithography	طباعة بالحُزمة الإلكترونية
imprint lithography	طباعة بالسكّ
dip pen lithography	طباعة بالقلم الغاطس
nano science	علم النانو
pheromone	فِرمون
decoherence	فكّ التماسك
quantum	كمَّة
amorphous	لامتبلور (عديم الهيئة)
plastic	لدِن
dashboard	لوحة السائق (لوحة العدّادات والمؤشرات في السيارة أو الطائرة)
automaton	مُؤَتْمَتة
switch	مِبدال، بدَّالة
transmission electron microscope (TEM)	مِجْهَر النفاذ الإلكتروني
sensor	مُحِسّ

allergen	مُحسِّس
catalyst	محفِّز تفاعل
spectroscopy	مِطيافية
size	مقاس
standardization	مَقْيَسة
pipeline	مُوارد
resolution	ميْز
quantum mechanics	ميكانيك كمومي
nano	نانو
top down	نزولي
electroosmosis	نضْح كهربائي
quantum dot	نقطة كمّومية
nanodot	نقطة نانوية
nuclues	نَواة
metastasize	ينتشر، يستفحل

ثَبْت المصطلحات: إنجليزي ـ عربي

adenosine triphosphate ATP	ثُلاثي فوسفات الأدِنوزين
allergen	مُحسِّس
amorphous	لامتبلور (عديم الهيئة)
amorphous computing	حَوْسَبة عديمة الهيئة
automaton	مُؤَتْمَتة
bioavailability	توافر حيوي
bottom up	صعودي
bulky	جَسِيم
catalyst	مُحفِّز تفاعل
charge	شِحنة
code	رِماز
colorimetry	تحليل لوني
cryptography	تعمية، تشفير
dashboard	لوحة السائق (لوحة العدّادات والمؤشّرات في السيّارة أو الطائرة)
decoherence	فكّ التماسك
dip pen lithography	طِباعة بالقلم الغاطس
e-beam lithography	طباعة بالحُزمة الإلكترونية
electroosmosis	نضْح كهربائي
electrophoresis	تهجير كهربائي

entanglement	تشابك
fluidics	سوائليات
imprint	سكّ
imprint lithography	طباعة بالسكّ
ion	شاردة
magnetic resonance imaging	تصوير بالرنين المغنطيسي
metastasize	ينتشر، يستفحل
microscopy	استجهار
molecular electronics	إلكترونيات جُزَيئية
nano	نانو
nano science	علم النانو
nano technology	تِقانة نانوية
nanodot	نقطة نانوية
nanoelectronics	إلكترونيات نانوية
nanofabrication	تصنيع نانوي
nanoscale	سُلَّم نانوي
net charge	شِحنة صافية
nuclues	نواة
pervasive computing	حَوْسَبة عميمة
pheromone	فِرمون
pipeline	مُوارد
plastic	لدِن
quantum	كمَّة
quantum computing	حَوْسَبة كمّومية
quantum dot	نقطة كمّومية

quantum mechanics	ميكانيك كمّومي
resolution	ميْز
self-assembly	تجميع ذاتي
sensor	مُحِسّ
size	مقاس
spectroscopy	مِطيافية
sphere lift off lithography	طباعة باقتلاع الكُرات
spin	تدويم (سبين)
standardization	مَقْيَسة
stock index	دليل الأسهم
swarm computing	حَوْسَبة سِربية
switch	مِبدال، بدَّالة
top down	نزولي
transmission electron microscope (TEM)	مِجْهَر النفاذ الإلكتروني

المؤلِّفان

البروفسور مارك راتنر Mark Ratner، أستاذ الكيمياء في جامعة نورثوِسترن ومدير مشارك لمعهد التِقانة النانوية والتصنيع النانوي في الجامعة. عمل طوال حياته في مجال الإلكترونيات الجُزَيئية، وهو حقل اشتُهر بتأسيسه في عام 1974، وأدّى إلى منحه جائزة فينمان Feynman لعام 2001 للتِقانة النانوية، وتعيينه عضواً في كلٍّ من أكاديمية العلوم القومية (الأميركية) والأكاديمية الأميركية للفنون والعلوم. ألَّف كتابين جامعيين متقدّمين في الكيمياء والتِقانة النانوية ومواضيع ذات صلة بهما، وأكثر من 400 مقالة علمية. وهو محاضر شهير في الإلكترونيات الجُزَيئية والتِقانة النانوية في مؤسّسات علمية في شتّى أنحاء العالم، إلا أنه يركِّز جهوده في العمل لدى جامعة نورثوِسترن (حيث حصل على درجة الدكتوراه وعمل عميداً مشاركاً لكلية الفنون والعلوم ورئيساً لقسم الكيمياء وحصل على جائزة التعليم المميَّز).

حصل البروفسور راتنر على الإجازة في الفنون .B.A من جامعة هارفارد، وهو مدير سابق للصناعات الكهركيميائية، وزميل لـ A. P. Sloan Foundation وجمعية الفيزياء الأميركية والـ AAAS. وهو يعمل أيضاً نائباً لرئيس الشركة ideapoint، وهي شركة بحوث ورأس مال مغامر متخصصة في التِقانة النانوية.

دان راتنر Dan Ratner، خبير في الشركات الناشئة في مجال التِقانة المتقدمة، ومشارك في تأسيس الشركة Driveitaway.com ونائب رئيسها ومديرها وكبير التقانيين فيها، وهي شركة أعمال في الوِب متخصّصة في مزادات بيع السيارات إلى الزبائن مباشرة. وقبل عمله في هذه الشركة، شارك في تأسيس شركة ISP Wired Business وكان كبير التقانيين فيها، وهي شركة رائدة في توزيع خطوط الإنترنت الرقمية. بدأ حياته مؤسِّساً للشركة الناشئة Snapdragon Technologies، وكان مديرها التنفيذي، وهي شركة استشارات للأعمال والتِقانة

متخصّصة بنظُم واستراتيجيات المعلومات على مستوى الولايات المتحدة. اختارته مجلة PhillyTech في عام 2001 بصفته واحداً من «الثلاثين تحت الثلاثين» من مؤسِّسي الشركات الجديدة في منطقة فيلادلفيا. وقبل انغماسه في تأسيس الشركات الناشئة عمل مهندساً كهربائياً لدى Zeller Research Ltd .

يحمل السيد راتنر درجة الفنون في الهندسة والاقتصاد من جامعة براون، وهو محاضر زائر لدى جامعة نورثوِسترن، وعضو مجلس إدارة الشركة Sittercity Inc . ومجلس المستشارين لدى المصرف First Colonial National Bank والشركة RMS Investment Corporation، ويعمل موجِّهاً لدى برنامج جامعة براون لتأسيس الشركات الجديدة. وقدم أخيراً محاضرات عن التِقانة النانوية والأعمال في مدرسة Kellog لدى جامعة نورثوِسترن.

فهـــرس

- أ -

آرمسترونغ، نيل: 20

آفوريس، فيدون: 74، 153

أبرونا، هكتور: 157

إثيلين ثنائي أمين رباعي حمض الخل: 107

الأخلاق النانوية: 191، 197

أدوات تصوير السلوك في السلَّم النانوي: 74

أدوات صنع البنى النانوية: 53، 59

أدوات قياس البنى النانوية: 53، 55

الارتباط: 39، 45، 48، 65، 120، 122-123، 129، 133، 158، 175

الأسلحة الحيوية: 16

الأسلحة الكيميائية: 16

الإشابة: 74

الأشعة تحت الحمراء: 118-119

الأشعة السينية: 56-57، 60، 118-119، 160

الأشعة فوق البنفسجية: 118، 193

إصلاح النُسُج: 22، 84

أفنير، ديفيد: 112

الاكتئاب: 129-130، 132

الأكسجين: 39، 44-47، 60، 107، 112، 134، 143، 164-165

التقاط الطاقة: 79، 84

التقاط طاقة الضوء: 141-142

الإلكترونات: 22، 35-42، 44، 47، 49-51، 58، 62، 73-74، 81، 89-91، 112، 144، 147-148، 150-151، 157، 195

الإلكترونيات: 13، 68، 141-142، 150، 152-153

الإلكترونيات الجزيئية: 33، 50، 77، 95-97، 124، 154، 157، 159

الإلكترونيات الجزيئية الطرية: 141، 154

إلكترونيات السليكون: 30-31

الإلكترونيات النانوية: 33، 128، 152، 200

ألياف الكربون: 73، 110، 196

أليفيساتوس، بول: 139

أنابيب السليكون النانوية: 74

أنابيب الكربون النانوية: 50، 68، 71-72، 74، 141، 153-154

الأنابيب النانوية: 72-74، 96، 98، 110، 153-154، 158-159، 195-196، 199

ـ الخواص الفيزيائية: 73

ـ الخواص الكهربائية: 73

الإنترنت: 11-12، 16-17، 49، 90، 179، 182، 184-185، 187، 189

الإنزيمات: 93، 108، 111-112، 132، 135

أنصاف النواقل: 29، 72، 74، 110، 141، 144-146، 148، 150-151، 153

الأنوف الإلكترونية: 115، 124

أودوم، تِري: 95

الأوليغونيكليوتيدات: 69

أوهالّوران، توم: 111

إيجيما، سوميو: 72

ـ ب ـ

بارك، هونغكون: 157

باو، زينان: 97

باوندي، مونغي: 110، 139

البذرة البلورية: 68

البروتون: 36

البروتينات: 45

البصريات: 13، 35، 52، 68، 79، 85، 141-142، 150، 156، 185

البلمرة: 69

البلورات الجزيئية: 68

البلورات الذرية: 68

البلورات الشاردية: 68

البلورات النانوية المقاس: 68

بنِّغ، غِرْد: 56

البنى الحيوية: 13، 83، 111، 116، 134

البنى الحيوية النانوية المقاس: 79، 83

البنى النانوية: 50، 64-66، 70-71، 75، 95-96، 104-105، 107، 113، 116، 133-134، 143، 145، 149، 153

البنى النانوية المتباينة الخواص: 101، 110
البنيانات: 141، 155، 159
البوابة المنطقية: 159
البوتاسيوم: 135-136
بوش (الابن)، جورج: 16
بول، جورج: 158
البولي إثيلين: 42-43، 45، 69، 71، 165
البوليستيرين: 42، 154
البوليمرات: 40، 42-44، 69، 74، 80، 107، 124، 137
البوليمرات البسيطة: 42
البوليمرات الشديدة التشابك: 42
البوليمرات الصنعية: 44
البوليمرات غير المنتظمة: 45
البوليمرات الكاسرة للضوء: 80-81
البوليمرات اللامتبلورة: 42

- ت -

تانغ، تشين: 85
التجميع الجزيئي الذاتي: 95
التجميع الذاتي: 65-70، 80، 83، 154
تجميع الذرات: 38-39
تحريك الشحنات بالضوء: 81
تحويل الطاقة: 79، 84
ترانزستور المفعول الحقلي: 157-158
الترشيح البالغ النعومة: 107
الترشيح النانوي: 107
التركيب الجزيئي: 64
التركيب الضوئي: 86، 104، 142-146
التصلُّب الضموري الجانبي: 137
تصلُّب النُسُج المتعدد: 137
التصميم النانوي بمساعدة الحاسوب: 75-77، 159
التصنيع النانوي: 27-28، 53-54، 65، 80، 95-96، 111، 199
التصنيع النانوي الصعودي: 27
التصنيع النانوي النزولي: 27، 54
التصوير بالمرنان المغنطيسي: 57
التعرُّف الجزيئي: 35، 47-49، 70، 81، 105-107، 117، 120، 122، 124، 131، 154
التغليف: 101، 106، 111-112، 131، 149
التغنيسيوم: 38
التفاعلات المتعددة القطبية: 66
التفاعلات النووية: 200
التقانة الحيوية: 69، 138، 177، 182-183، 185-187، 197

تقنية «مخبر على شريحة»: 86-88، 121، 125، 173

التنبُّؤات الحاسوبية: 75

تنمية البلورات: 68، 105

تنمية البلورات في السلَّم النانوي: 68

التهجير الكهربائي: 88

التهجين: 69

توليد الضوء: 85، 141، 147

توليد الضوء من الكهرباء: 85

التيار: 50

- ث -

ثلاثي فوسفات الأدنوزين: 135، 143-144

الثنائيات المشعة للضوء: 85، 147-149، 194

- ج -

جامعة دلفت التقانية (هولندا): 17، 153

جامعة كاليفورنيا (الولايات المتحدة): 107، 158

جامعة نورثوِسترن (الولايات المتحدة): 17، 19، 62-63، 66، 69، 80-81، 83، 96-97، 111، 122، 132، 135، 148، 161، 189

- مركز التصنيع النانوي والتجميع الذاتي الجزيئي: 80

جامعة هارفارد (الولايات المتحدة): 60، 68، 105، 153، 157

جائزة التعليم المميَّز: 227

جائزة فينمان: 17

جائزة نوبل: 17، 53-54، 56، 71

جزيء ثنائي أكسيد الكربون: 40

جزيء الماء: 40، 66

الجزيئات: 39-40، 45، 47، 98، 122

الجزيئات الحيوية: 45، 47، 49

الجزيئات الحيوية الكبيرة: 49

الجزيئات الصغيرة: 40

الجزيئات الصفيحية: 45-46

الجزيئات الكبيرة: 42، 47، 143

الجمرة الخبيثة: 18، 123، 125، 175، 196، 198

الجهد: 50

جونسون، بن: 25

- ح -

الحمض النووي: 137

الحموض الأمينية: 45، 120، 137، 182

الحوسبة بالدنا (DNA): 88، 91، 94، 120، 157، 159، 200

الحوسبة السربية: 78، 159

الحوسبة العديمة الهيئة: 77-78

الحوسبة الكمومية: 89-90، 94، 157، 159، 200

- خ -

خزن الطاقة: 79، 84

خلايا غريتسل: 84-86، 119، 146

خواص البنى النانوية: 29

الخواص الكهربائية الخصبة: 74

الخواص الكيميائية: 37، 40

خواص المادة: 26، 30، 57

- د -

الدارات: 50

دالُّس، بيتر: 135

دكَّر، سيز: 153

الدنا (DNA): 43، 45-47، 69-70، 120-122، 165

دودابالابور، أنانث: 97

ديفي، همفري: 82

- ذ -

الذرات: 38-41، 51، 71

الذرات السالبة: 38

الذرات غير المشحونة: 38

الذرات المحايدة: 38

الذواكر: 141، 152، 155-157

- ر -

راتنر، دان: 14

راتنر، مارك: 14

رالف، دان: 157

رايموند، كِن: 107

الرنا (RNA): 45

الروابط: 40، 42، 44

الروابط الكيميائية: 39، 41، 64، 84

الروابط الهدروجينية: 66

الروتاكسانات: 159

رورَر، هاينريش: 56

روكو، مايك: 22

ريد، مارك: 95

- س -

ستَبّ، سام: 83، 95

ستودارت، فرازر: 158

السلَّم الجزيئي: 13

السلَّم الذري: 70، 74

سلَّم المقاسات الكبيرة: 26، 28-29، 49، 51، 96، 102، 117-118

السلَّم المكروي: 32، 49، 56، 61

السلَّم النانوي: 14، 20-23، 26-28، 30، 36، 38، 40، 44، 51، 54-56، 58، 60-61، 67-68، 74-77، 80-81، 83، 85، 89، 91، 94-96، 98، 101، 103-104، 106، 108، 111-113، 116-118، 128-129، 139، 148، 150، 153، 157، 162، 166، 193

سمولِّي، ريتشارد: 53، 70

السوائليات المكروية: 87

السوائليات النانوية: 87

سواين، ديفيد: 101

السيراميكات: 42-44، 75

سيلفرمان، ريتشارد: 132

- ش -

شاتس، جورج: 97، 122

الشحنات السالبة: 36-37، 45، 47، 85، 144

الشحنات الكهربائية: 40-41، 49-50، 117، 152

الشحنات الموجبة: 36-38، 47، 145

الشرائح الإلكترونية: 76، 87

الشرائح المكروية: 30-32، 50، 68، 74-75، 77، 89، 181

شركة Abbott: 182

شركة Affymetrix (الولايات المتحدة): 88، 200

شركة Agilent (الولايات المتحدة): 87-88، 173، 180، 200

شركة Air Products Corporation: 107

شركة Amgen: 183

شركة Barnes and Noble: 184

شركة Baxter: 182

شركة Dow Chemical Company: 107

شركة Genentech: 183

شركة Glaxo: 182

شركة HP: 159

شركة IBM: 17، 55، 74، 76، 94، 153، 155، 171، 180، 182

شركة Lilly: 182

شركة Merck: 180، 182

شركة NanoInk (الولايات المتحدة): 62

شركة Pfizer: 182

شركة Pharmacia: 182

شريحة GeneChip: 88

الشوارد: 35، 37-38، 40، 51

الشوارد السالبة: 38

الشوارد المشارِكة: 39

الشوارد الموجبة: 38–39

ـ ص ـ

الصوديوم: 40، 68، 109، 135–136

ـ ط ـ

الطاقة الحرارية: 52، 95، 142، 147

الطاقة النووية: 142، 147

الطباعة باقتلاع الكرات النانوية: 63، 122

الطباعة بالحزمة الإلكترونية: 62–63، 95، 168

الطباعة بالختم النانوي: 62

الطباعة بالسك المكروي: 60

الطباعة في السلَّم النانوي: 60

الطباعة النانوية: 61–62، 71، 95، 156، 184

الطباعة النانوية بالقلم الغاطس: 61–62، 71، 95، 156

الطلب بنقرة واحدة: 184

طول الموجة: 58، 60، 62، 133، 159–160

ـ ع ـ

العظم الصنعي: 83–84، 132

العقاقير: 47، 64، 120، 127–132، 178، 182، 197

ـ غ ـ

غَديري، رِزا: 105

غريتسل، مايكل: 84، 118

غيتس، بل: 158

غينغريش، نيوت: 16، 187

ـ ف ـ

فازيليوسكي، مايكل: 80

فان دوين، ريتشارد: 122

فان دوين، ريك: 63، 95

الفثالوسيانين: 52

فيزياء السلَّم النانوي: 30

فينمان، ريتشارد: 54، 61، 166

ـ ق ـ

قانون أوم: 22، 35، 49–50، 75–76

قانون كولون: 40، 47، 49–50، 65، 75

قانون مور: 31–32، 59–60، 62، 66، 89، 98، 150، 152–153، 155، 159

قانون مور للتبسيط: 31–32

القرميد النانوي: 70

قواعد الانتقال: 92–93

قوة التجاذب: 39

القياسات بمجسَّات المسح: 95

- ك -

كاتس، هوارد: 97

كبريت الألكان: 71

الكربون: 42

كلينتون، بيل: 16

الكهرباء الساكنة: 43

الكهرضوئيات: 141-142، 144

الكهركيمياء: 58

كولْوِل، ريتا: 15

الكيمياء التركيبية: 74

- ل -

لِتْسينغر، روبرت: 69، 125

اللدائن: 42

اللصيقات النانوية التلألؤ: 127، 138

ليبر، تشارلز: 68، 96، 105، 148، 153

ليبرمان، جوزيف: 16

الليثيوم: 38، 150

ليدينغ، جو: 96

- م -

مادة Gore-Tex: 106، 112

المادة النانوية المركَّبة الذكية المتباينة الخواص: 113

ماركس، توبين: 148

ماكْأُوين، بول: 153، 157

المبادرة القومية للتقانة النانوية (الولايات المتحدة): 16، 18-19، 71، 161، 187

المجاهر الإلكترونية: 55، 58-59

مجاهر القوة الذرية: 55-56، 61-62، 66

مجاهر القوة الماسحة: 55

مجاهر مجسَّات المسح: 55-57

مجاهر المسح المكروي: 56

مجاهر المسح النفقي: 56، 96

مجاهر النفاذ الإلكتروني: 58-59

مجسَّات المسح: 55-59، 63، 70، 95

مجمَّع جَنْي الضوء: 143

مجهر القوة المغنطيسية: 56

المحركات الجزيئية: 127، 134-135

المُجِسَّات: 13، 79، 81-83، 115-122، 124-125، 185

المُجِسَّات الحيوية: 115، 120، 125

المُجِسَّات الكهرمغنطيسية: 115، 118، 120

المُجِسَّات النانوية الطبيعية: 115-116

محفِّزات التفاعل: 101، 105، 108-109، 131-132، 192

المحلَّلة: 81-82، 122
مـخـابـر آرغـون الـقـومـيـة (الـولايـات المتحدة): 80
المرسلات العصبونية: 129
مركز التفاعل: 143
مركز العلوم النانوية القومي (الصين): 17
المركَّبات النانوية المتباينة الخواص: 101، 110
مشهد الاستثمار: 177، 183
المطيافية: 57-58
المعادن: 41-44، 49، 74
المعالجة الضوئية الديناميكية: 127، 133-134
المِعداد النانوي: 23، 56، 162
مفهوم المحسَّات: 82
المقاومة: 50
الملتَقيات العصبية الإلكترونية: 127، 135-136، 183
الـمـنظـومـات الإلـكـتـروميـكـانـيـكـيـة المكروية: 22-24، 117
المنظومات الحيوية: 35، 44، 106، 137
الـمـواد الـذكـيـة: 13، 79-81، 101-103، 105، 111-112، 132، 185، 192-193
مور، غوردون: 31
مورَّاي، كريس: 94، 155
المونومرات: 42، 69
ميركين، تشاد: 62، 95، 110، 122، 124
الميكانيك العادي: 51، 75
الميكانيك الكمومي: 13، 35، 50-52، 75، 77، 89، 118، 141، 153

- ن -

نامان، رون: 157
النانوية والتصنيع النانوي: 111
النترون: 36
نصف الناقل المتمِّم لأكسيد المعدن (CMOS): 75-76، 159-160، 171
النضح الكهربائي: 88
الـنـقـاط الـكـمـومـيـة: 27، 95، 134، 139-140
النقاط النانوية: 27، 29، 91، 123، 131، 134، 175
نقل الضوء: 141، 149
النقل الكهربائي: 35، 49، 56، 153
النمذجة: 75، 79، 97-98
النواة الكثيفة الثقيلة: 37
النواقل الفائقة: 50، 74

نيوتن، إسحق: 50

- هـ -

هَبّ، جو: 81، 95، 112

الهدروجين: 36-39، 44-46، 66، 96، 143، 164-165

هِرسام، مارك: 96

الهليوم: 38

هندسة البروتينات: 127، 137-138

هيث، جيم: 158

هيئة العلوم القومية (الولايات المتحدة): 14-17، 22، 178

الهيئة القومية للصحة (الولايات المتحدة): 16، 180

- و -

واحدات القياس المترية: 24

وايتسايدس، جورج: 60، 96

وزارة الدفاع (الولايات المتحدة): 14، 16

وزارة العدل (الولايات المتحدة): 16

وكالة حماية البيئة (الولايات المتحدة): 16

وليامز، ستان: 141، 158

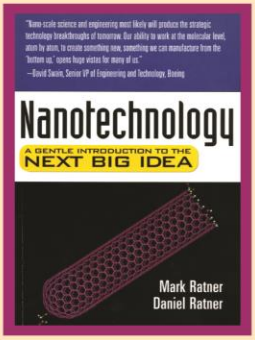
- ي -

يانغ، بايدونغ: 105

اليورانيوم: 38، 199

التقانة النانوية

مقدمة مبسَّطة للفكرة العظيمة القادمة(*)



(*) الكتاب الأول من النانو

السلسلة: تضم هذه السلسلة ترجمة لأحدث الكتب عن التقنيات التي يحتاج إليها الوطن العربي في البحث والتطوير ونقل المعرفة إلى القارئ العربي.

الكتاب: في هذا الكتاب تمكن المؤلفان من سبر غور حقول التقانة النانوية (النانوتكنولوجيا) من حيث التكنولوجيا والأعمال مغطيَّن بذلك مواضيع أساسية مثل النانوبوت، والالكترونيات الجزيئية، والحوسبة الكمومية، والبنى الحيوية، والأنابيب النانوية، والمحركات الجزيئية، والمجسمات النانوية، وغيرها.

ويوفر الكتاب بأسلوبٍ سلس وسهل الفهم أيضاً تقويماً عقلانياً لمجالات الاستثمار في هذه التكنولوجيا على المدى القريب والبعيد، بالإضافة إلى ما يتصل بها من مفاهيم أخلاقية وقيمية.

المؤلف: **مارك راتنر:** بروفيسور الكمياء في جامعة نورث ويسترن والحائز على جائزة فيمان في النانوتكنولوجيا لعام ٢٠٠١.

دانيال راتنر: مهندس ومقاول تقني، ومؤسس لشركتين في التكنولوجيا الدقيقة، ومستشار صناعي لعدد من شركات التكنولوجيا المتقدمة وقد منح مؤخراً تقديراً في مجلة *Philly Tech*.

المترجم: **حاتم النجدي:** أستاذ في الجامعات السورية متخصص بالإلكترونيات والاتصالات، ويهتم بالترجمة العلمية من الإنجليزية إلى العربية.

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة

1. المياه
2. البترول والغاز
3. البتروكيمياء
4. النانو
5. التقنية الحيوية
6. تقنية المعلومات
7. الإلكترونيات والاتصالات والضوئيات
8. الفضاء والطيران
9. الطاقة
10. المواد المتقدمة
11. البيئة

المنظمة العربية للترجمة

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

الثمن: 15 دولاراً
أو ما يعادلها

ISBN 978-9953-08-238-7

التقانة النانوية
مقدمة مبسَّطة للفكرة العظيمة القادمة
مارك راتنر
دانيال راتنر
(4 - 1)